

Otto Isoniemi

**Hyllystöhissin ohjauskeskuksen värähtelynvaimennus**

Opinnäytetyö

Kevät 2012

Tekniikan yksikkö

Tietotekniikan koulutusohjelma

Mekatroniikka



# SEINÄJOEN AMMATTIKORKEAKOULU

## OPINNÄYTETYÖN TIIVISTELMÄ

Koulutusyksikkö: Tekniikan yksikkö

Koulutusohjelma: Tietotekniikan koulutusohjelma

Suuntautumisvaihtoehto: Mekatroniikan suuntautumisvaihtoehto

Tekijä: Otto Isoniemi

Työn nimi: Hyllystöhissin ohjauskeskuksen värähtelynvaimennus

Ohjaaja: Markku Kärkkäinen

Vuosi: 2012

Sivumäärä: 58

Liitteiden lukumäärä: 0

---

Materiaalinkäsittelyjärjestelmiä valmistavassa Pesmel Oy:ssä oli havaittu, että hyllystöhissien ja siirtovaunujen sähkökeskuksiin oli kohdistunut liiallista värinää. Värinät olivat aiheuttaneet keskuksien sähkökomponenteissa vikaantumisia ja jopa vaurioitumisia. Tämän opinnäytetyön tavoitteena oli tutkia, miten liiallista värinää voidaan vaimentaa ja mitä vaimentamisessa on tärkeää ottaa huomioon.

Työssä perehdyttiin aluksi värähtelytekniikkaan, värinänvaimentimiin ja niiden kuormitustilanteisiin sekä värinänvaimentimien valintataulukkoon. Työssä tutkittiin myös millaisia ovat hyllystöhisseissä ja siirtovaunuissa käytettyjen sähkökomponenttien värinänkestoisuusarvot.

Värinänmittaukset suoritettiin aluksi Pesmel Oy:ssä sijaitsevan korkeavarastojärjestelmän hyllystöhissin sähkökeskuksista. Mittauksien tarkoituksena oli selvittää, minkälaisia värähtelyitä hyllystöhissin normaaleissa käyttötilanteissa esiintyy ja vertailla niitä tutkittavien sähkökomponenttien värinänkestoisuuksiin. Mittauksissa esiintyi tilanne, jossa hyllystöhissi pysähtyi kokonaan odottamattomasti täydestä vauhdista, eikä ehtinyt hidastamaan nopeuttaan kuten normaalissa käyttötilanteessa. Värähtelyt hyllystöhissin keskuksissa todettiin vaimeiksi, vaikka keskuksien oli asennettu ilman vaimentimia. Hyllystöhissin mittaustuloksista voitiin myös huomata, että sähkökomponentit kestävät erinomaisesti suurimmankin värähtelyn, mitä hyllystöhissi sai aikaan.

Hyllystöhissin värinänmittauksien jälkeen suoritettiin mittaus, jossa sähkökeskusta vedettiin pumppukärryjen päällä ja mitattiin keskukseseen kohdistuneita värähtelyitä. Tämän mittauksen tarkoituksena oli tutkia, miten suuria vaikutuksia on sillä, onko keskus asennettu värinänvaimentimien kanssa vai ilman. Vaimentimien lisäämisen huomattiin selkeästi vaimentavan värähtelyä keskuksessa. Mittauksissa tutkittiin myös erisuuruisten kuormien vaikutusta värinänvaimentimien toimivuuteen. Mittaustuloksissa huomioimisen arvoista oli myös se, että vaimentimet kannattaa valita niin, että vaimentimien nimelliskuorma vastaa sähkökeskuksen painoa.

Asiasanat: vaimennus, värähtelyt

SEINÄJOKI UNIVERSITY OF APPLIED SCIENCES

**Thesis abstract**

Faculty: School of Technology  
Degree programme: Information Technology  
Specialisation: Mechatronics

Author: Otto Isoniemi

Title of the thesis: Damping vibration in a warehouse lift's control center

Supervisor: Markku Kärkkäinen

Year: 2012                      Number of pages: 58      Number of appendices: 0

---

This thesis was commissioned by Pesmel Oy which manufactures material handling systems. The company had had problems with excess vibration in electrical enclosures of warehouse lifts and transfer cars, which in turn had caused defects in electrical components. The purpose of this thesis was to study how to damp vibrations and what is important in damping vibrations.

At first vibration theory and vibration dampers were studied. Vibration resistance values of electrical components used in warehouse lifts and transfer cars were found out.

Vibration measurements were started with measurements from electrical enclosures of a warehouse lift at Pesmel Oy. The vibrations were weak even though the enclosures were assembled without dampers. The electrical components should withstand even the strongest vibrations measured.

Next, vibrations were measured from an electrical enclosure on a pallet truck. The purpose of this measurement was to find out what is the vibration of an enclosure which is assembled with or without dampers. The dampers significantly reduced the vibrations. The measurements were done with different weight loads and the performance of the dampers was studied. The nominal load of dampers should correspond with the weight of an enclosure.

Keywords: damping, vibration

## SISÄLLYS

### TIIVISTELMÄ

### ABSTRACT

### SISÄLLYS

### KUVIO- JA TAULUKKOLUETTELO

### KÄYTETYT TERMIT JA LYHENTEET

<b>1 JOHDANTO .....</b>	<b>10</b>
1.1 Työn tausta, sisältö ja tavoitteet .....	10
1.2 Pesmel Oy .....	10
<b>2 VÄRÄHTELYTEKNIIKAN PERUSTEET .....</b>	<b>12</b>
2.1 Harmoninen värähdysliike .....	12
2.2 Vapaa vaimentamaton värähtely .....	12
2.3 Vapaa vaimennettu värähtely .....	16
2.3.1 Aperioidinen tapaus .....	17
2.3.2 Kriittinen tapaus .....	18
2.3.3 Alikriittinen tapaus .....	19
2.4 Jaksollinen vaimennettu pakkovärähtely .....	20
<b>3 VÄRINÄNVAIMENTIMET .....</b>	<b>22</b>
3.1 Värinvaimentimet yleisesti .....	22
3.2 Värinänvaimentimien kuormitustilanteet .....	22
3.3 Yleistä asiaa värinänvaimentimien valinnasta .....	24
3.4 Paulstradyn-värinänvaimennin .....	25
3.4.1 Paulstradyn-vaimentimen valinta valintataulukosta .....	25
3.5 Radiaflex-värinänvaimennin .....	28
3.5.1 Radiaflex-vaimentimen valinta valintataulukosta .....	29
3.6 Värinänvaimentimien asennus .....	31
<b>4 SÄHKÖKOMPONENTTIEN VÄRINÄNKESTOISUUDET .....</b>	<b>32</b>
<b>5 VÄRINÄNMITTAUKSET .....</b>	<b>34</b>
5.1 Larson Davis HVM 100 -mittauslaitteisto .....	34

5.2 Väri­änmittaus Larson Davis HVM 100 -mittauslaitteistolla.....	35
5.3 Hyllystöhissi korkeavarastojärjestelmässä.....	36
5.4 Väri­änmittaukset hyllystöhissistä.....	37
5.4.1 Mitta-anturin sijainti pääkeskuksessa .....	38
5.4.2 Mitta-anturin sijainti ohjauskeskuksessa.....	40
5.5 Väri­änmittaukset pumppukärryjen päällä olevasta sähkökeskuksesta ....	40
5.5.1 Mitta-anturin sijainti sähkökeskuksessa .....	41
5.5.2 Väri­änmittaukset Paulstradyn-vaimentimilla .....	42
5.5.3 Väri­änmittaukset Radiaflex-vaimentimilla .....	43
<b>6 MITTAUSTULOSTEN ANALYSOINTI .....</b>	<b>44</b>
6.1 Johdatus tulosten analysointiin .....	44
6.2 Tuloksien pohdintaa hyllystöhissin sähkökeskuksista.....	44
6.2.1 Mittaustulokset pääkeskuksesta.....	44
6.2.2 Mittaustulokset ohjauskeskuksesta.....	45
6.3 Tuloksien pohdintaa sähkökeskuksen ollessa pumppukärryjen päällä.....	47
6.3.1 Mittaustulokset sähkökeskuksen ollessa ilman vaimentimia .....	47
6.3.2 Mittaustulokset Paulstradyn-vaimentimilla.....	48
6.3.3 Mittaustulokset Radiaflex-vaimentimilla .....	50
<b>7 JOHTOPÄÄTÖKSET .....</b>	<b>53</b>
<b>8 YHTEENVETO.....</b>	<b>54</b>
<b>LÄHTEET .....</b>	<b>57</b>

## KUVIO- JA TAULUKKOLUETTELO

Kuvio 1. Vapaa vaimentamaton värähtely.....	12
Kuvio 2. Jousi, massa ja tasapainoasema.....	13
Kuvio 3. Värähtelyn amplitudi ja vaihekulma.....	14
Kuvio 4. Ulokepalkin värähtely.....	15
Kuvio 5. Vapaa vaimennettu värähtely.....	16
Kuvio 6. Aperiodidisesti ja kriittisesti vaimennettu värähtely. ....	18
Kuvio 7. Aikajaksollinen liike. ....	19
Kuvio 8. Vaimennettu pakkovärähtely.....	20
Kuvio 9. Aksiaali- eli puristussuuntainen kuormitustilanne.....	23
Kuvio 10. Radiaali- eli leikkaussuuntainen kuormitustilanne.....	23
Kuvio 11. Paulstradyn-värinänvaimennin.....	25
Kuvio 12. Paulstradyn-värinänvaimentimien valintataulukko. ....	27
Kuvio 13. Radiaflex-värinänvaimentimia on saatavilla useilla eri kiinnitysvaihto- ehdoilla. ....	28
Kuvio 14. Kierrepulttikiinnitteinen Radiaflex-värinänvaimennintyyppi.....	29
Kuvio 15. Kierrepultein kiinnitettävien Radiaflex-värinänvaimentimien valinta- taulukko. ....	30

Taulukko 1. Komponenttien värinänkestoisuusarvoja.....	33
Kuvio 16. Larson Davis HVM 100 -mittauslaitteisto antureineen.....	34
Kuvio 17. Valitaan mittaustavaksi käsitärinä.....	35
Kuvio 18. Valitaan mittausvälien keskiarvoksi 10 sekuntia.....	35
Kuvio 19. Värähtelyherkkyyden säätö.....	36
Kuvio 20. Pesmel Oy:ssä sijaitseva hyllystöhissi.....	37
Kuvio 21. Korkeavarastojärjestelmän pohjapiirros.....	38
Kuvio 22. Värinämittarin anturi kiinnitettynä sähkökeskuksen Din-kiskoon.....	39
Kuvio 23. Anturin koordinaattien suunnat hyllystöhissin pääkeskuksessa.....	39
Kuvio 24. Anturin koordinaattien suunnat hyllystöhissin ohjauskeskuksessa.....	40
Kuvio 25. Anturin koordinaattien suunnat pumppukärryillä olevassa sähkökeskuk- sessa.....	41
Kuvio 26. Sähkökeskus kiinnitettynä kuormalavaan Paulstradyn 533704 -värinän- vaimentimilla.....	42
Kuvio 27. Sähkökeskus kiinnitettynä kuormalavaan Radiaflex 521310 -värinän- vaimentimilla.....	43
Kuvio 28. Värinänmittaus hyllystöhissin pääkeskuksesta.....	45
Kuvio 29. Värinänmittaus CP02-keskuksesta hyllystöhissin pysähtyessä täydestä vauhdista.....	46

Kuvio 30. Värinänmittaus ilman vaimentimia, keskuksen paino 60 kg. ....	48
Kuvio 31. Värinänmittaus Paulstradyn-vaimentimilla, keskuksen paino 84,5 kg. ..	49
Kuvio 32. Värinänmittaus Paulstradyn-vaimentimilla, keskuksen paino 60 kg. ....	50
Kuvio 33. Värinämittaus Radiaflex-vaimentimilla, keskuksen paino 84,5 kg. ....	51
Kuvio 34. Värinämittaus Radiaflex-vaimentimilla, keskuksen paino 149 kg. ....	52



## KÄYTETYT TERMIT JA LYHENTEET

<b>Kuormitustilanne</b>	Vaimentimeen kohdistuva vaimennettavan kohteen suuruinen paino eli kuorma.
<b>Aksiaalikuormitus</b>	Aksiaali- eli puristussuuntaisessa kuormitustilanteessa vaimentimeen kohdistuu kuorma ylhäältä alaspäin.
<b>Radiaalikuormitus</b>	Radiaali- eli leikkaus- eli säteittäissuuntaisessa kuormitustilanteessa vaimentimeen kohdistuu sivuttaissuuntainen kuorma.
<b>Nimelliskuorma</b>	Yhteen vaimentimeen kohdistuva suositeltava kuorma. Nimelliskuorman yksikkö on voiman yksikkö N, Newton.
<b>Värähtelynherkkyys</b>	Tarkoitetaan värähtelymittauslaitteiston mittausanturin mittausherkkyyttä. Värähtelynherkkyys ilmaistaan desibeliasteikolla.
<b>Väriinänkestoisuusarvo</b>	Tarkoittaa värähtelyä, joka sähkökomponentin pitäisi vikaantumatta kestää.

# 1 JOHDANTO

## 1.1 Työn tausta, sisältö ja tavoitteet

Materiaalinkäsittelyjärjestelmiä valmistavassa Pesmel Oy:ssä on havaittu, että hyllystöhissien ja siirtovaunujen sähkökeskuksiin on kohdistunut liiallista värinää. Värinät ovat aiheuttaneet keskuksien sähkökomponenteissa vikaantumisia ja jopa vaurioitumisia. Työn tavoitteena on tutkia, miten liiallista värinää voidaan vaimentaa ja mitä vaimentamisessa on tärkeää ottaa huomioon.

Aluksi työssä tutustutaan teoreettisesti värähtelyyn, värinänvaimennukseen sekä sähkökomponenttien värinänkestoisuuksiin. Työssä käydään läpi värähtelytekniikan perusteita, erilaisia värinänvaimennintyyppejä, värinänvaimentimien kuormitustilanteita sekä vaimentimien valitsemista valintataulukosta. Lisäksi selvitetään, minkälaisia ovat hyllystöhisseissä ja siirtovaunuissa käytettävien sähkökomponenttien värinänkestoisuudet.

Työn seuraavassa vaiheessa suunniteltiin värinänmittauksien suorittaminen. Värinänmittaukset suoritettiin aluksi Pesmel Oy:ssä sijaitsevan hyllystöhissin pää- ja ohjauskeskuksesta. Tämän jälkeen tehtiin värinänmittaus, jossa sähkökeskus sijaitsi pumppukärkyjen päällä. Värinänmittauksissa käytettiin erityistä värinämittaria, jolla värinää voitiin mitata. Lopuksi työssä analysoidaan mittaustuloksia ja pohditaan mitä värinänvaimentamisessa on tärkeää ottaa huomioon.

## 1.2 Pesmel Oy

Pesmel Oy on Kauhajoelle vuonna 1978 perustettu materiaalinkäsittelyjärjestelmiä valmistava yritys. Pesmel toimittaa järjestelmiään metalli-, paperi- ja kappaletavarateollisuudelle. Järjestelmät koostuvat automaattisista pakkaus-, lajittelu-, kuljetus-, lastaus- ja varastointijärjestelmistä. Yrityksen liikeideana on suunnitella ja tuottaa järjestelmiä, joiden avulla asiakkaat voivat saada toimintaansa tehok-

kaammaksi kustannussäästöjään lisäten. Pesmel työllistää yhteensä noin 240 henkilöä. Pesmelin päätoimipaikka ja tehdas sijaitsevat Kauhajoella. Lisäksi Pesmelillä on kolme muuta toimipaikkaa Suomessa, tehdas Virossa, sekä useita tytäryhtiöitä ympäri maailmaa. (Pesmel Oy [Viitattu: 5.3.2012]; Suomen Luettelomedia Oy [Viitattu: 5.3.2012].)

## 2 VÄRÄHTELYTEKNIIKAN PERUSTEET

### 2.1 Harmoninen värähdysliike

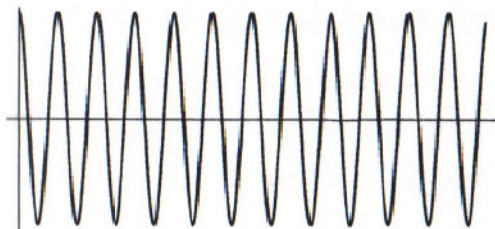
Värähdysliikkeellä tarkoitetaan tietyn pisteen, eli tasapainoaseman ohi edestakaisin toistuvaa jaksoittaista liikettä. Maksimipoikkeamaa tasapainoasemasta kutsutaan amplitudiksi. Yhteen edestakaiseen värähdykseen kulunutta aikaa kutsutaan jaksonajaksi  $T$ . Värähdysliikkeen taajuus  $f_0$  tarkoittaa tietyssä ajassa tapahtuvien värähdysten määrää. (Peltonen, Perkkiö & Vierinen 2004, 66–67.)

$$f_0 = \frac{1}{T} \quad (1)$$

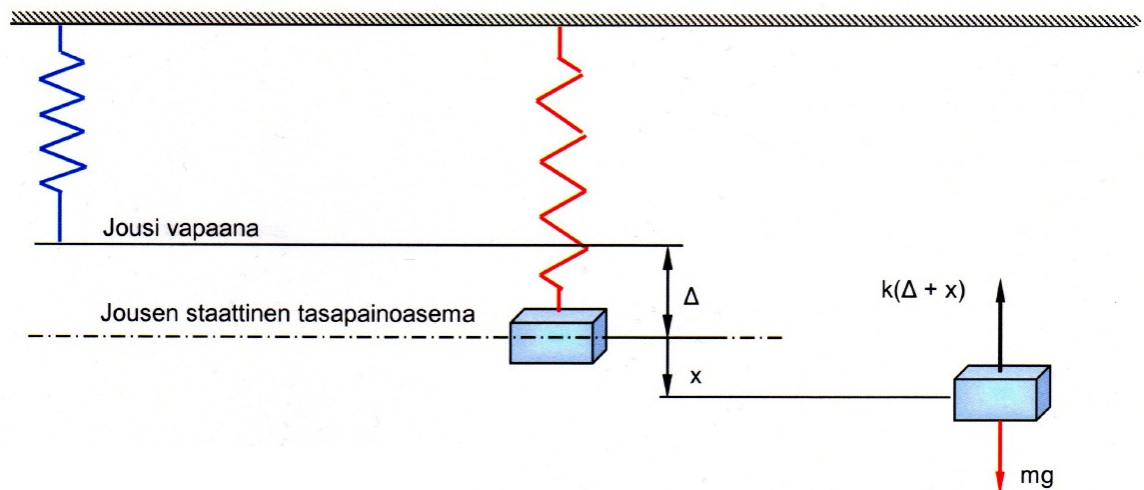
Taajuuden yksiköksi saadaan  $[f_0] = \frac{1}{s} = \text{Hz}$ , hertsi (Peltonen ym. 2004, 67).

### 2.2 Vapaa vaimentamaton värähtely

Mekaanisen systeemin värähtely voi olla vapaata eli niin sanottua ominaisvärähtelyä, jolloin systeemeissä ei ole vaimennusta eikä herätettä. Tätä voidaan havainnollistaa kuviossa 1, jossa esitetään vapaalle vaimentamattomalle värähtelylle ominaista liikettä. (Pennala 1999, 21.)



Kuvio 1. Vapaa vaimentamaton värähtely (Pennala 1999, 21).



Kuvio 2. Jousi, massa ja tasapainoasema (Kärkkäinen).

Kuvio 2 esittää jousen varaan ripustettua massaa, jota poikkeutetaan tasapainoasemastaan alaspäin. Tällöin saadaan kuvan merkinnöin

$$m \cdot \frac{d^2x}{dt^2} = -k(\Delta + x) + m \cdot g \Rightarrow m \cdot \frac{d^2x}{dt^2} + k \cdot x = 0, \text{ sillä } m \cdot g = k \cdot \Delta \quad (2)$$

Esiintyvät merkinnät ovat,  $k$  = jousivakio,  $m$  = massa,  $g$  = putoamiskiihtyvyys,  $t$  = aika,  $x$  = matka,  $\Delta$  = matkan muutos.

Jakamalla edellinen yhtälö massalla, ja merkitsemällä  $\frac{k}{m} = \omega_n^2$ , saadaan

$$\frac{d^2x}{dt^2} + \omega_n^2 \cdot x = 0 \quad (3)$$

joka on vapaan vaimentamattoman värähtelyn perusyhtälö, jossa  $\omega_n$  on nimeltään ominaiskulmataajuus

Tämän toisen kertaluvun differentiaaliyhtälön ratkaisu on muotoa

$$x = A \cdot \sin(\omega_n) \cdot t + B \cdot \cos(\omega_n) \cdot t \quad (4)$$

Koska

$$\omega_n = 2 \cdot \pi \cdot f = 2 \cdot \frac{\pi}{T} \Rightarrow T = \frac{2 \cdot \pi}{\omega_n} \quad (5)$$

kuvaa yhtälö harmonista värähdysliikettä, jonka jakso on  $T$ . Yhtälö 4 voidaan kirjoittaa muotoon

$$x = X \cdot \sin(\omega_n \cdot t + \varphi) \quad (6)$$

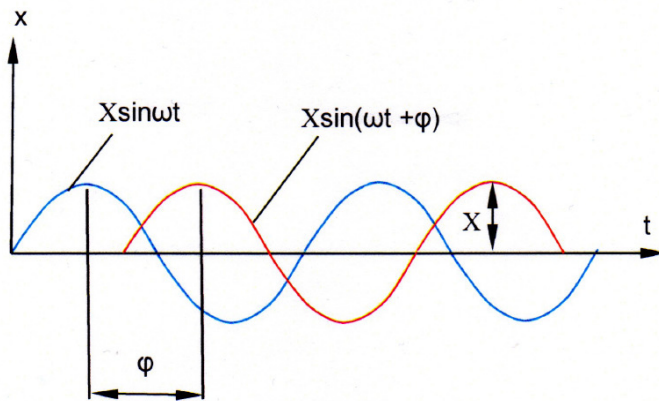
, sillä  $\sin(\omega_n \cdot t + \varphi) = \sin\omega_n \cdot t \cdot \cos\varphi + \cos\omega_n \cdot t \cdot \sin\varphi$ , joten

$$x = X \cdot \sin(\omega_n \cdot t + \varphi) = \underbrace{X \cdot \cos\varphi}_A \cdot \sin\omega_n \cdot t + \underbrace{X \cdot \sin\varphi}_B \cdot \cos\omega_n \cdot t \quad (7)$$

Vertaamalla yhtälöitä 4 ja 7 saadaan

$$X = \sqrt{A^2 + B^2} \text{ sekä } \tan \varphi = \frac{B}{A} \quad (8)$$

$X$  on siis värähdysliikkeen amplitudi ja  $\varphi$  vaihekulma. Tätä havainnollistaa kuvio 3



Kuvio 3. Värähtelyn amplitudi ja vaihekulma (Kärkkäinen).

Koska  $m \cdot g = k \cdot \Delta \Rightarrow k = \frac{m \cdot g}{\Delta}$  voidaan ominaiskulmataajuus lausua myös staattisen poikkeaman avulla, jolloin

$$\omega_n = \sqrt{\frac{g}{\Delta}} \quad T = 2 \cdot \pi \sqrt{\frac{\Delta}{g}} \quad f = \frac{\omega}{2 \cdot \pi} = \frac{1}{2 \cdot \pi} \cdot \sqrt{\frac{g}{\Delta}} \quad \omega_n \cdot T = 2 \cdot \pi \quad (9)$$

Useimmiten joudutaan amplitudi  $X$  ja vaihekulma  $\varphi$  määrittämään alkuehdoista  $x = x_0$ , kun  $t = 0$  ja  $\frac{dx}{dt} = v_0$ , kun  $t = 0$ . Derivoimalla yhtälö 6 saadaan

$$\frac{dx}{dt} = \omega_n \cdot X \cdot \cos(\omega_n \cdot t + \varphi) \quad (10)$$

Tekemällä alkuarvosijoitukset yhtälöihin 6 ja 10 saadaan

$$X = \frac{v_0}{\omega_n \cdot \cos \varphi} \text{ ja } X = \frac{x_0}{\sin \varphi} \quad (11)$$

sijoittamalla nämä yhtälöön 7 saadaan

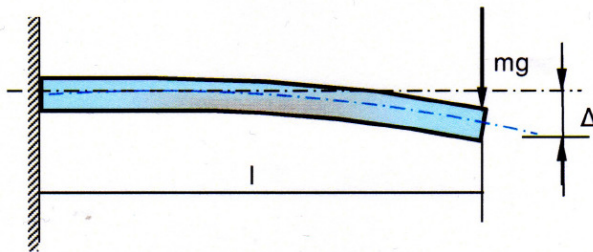
$$X = \frac{v_0}{\omega_n} \cdot \sin \omega_n \cdot t + x_0 \cdot \cos \omega_n \cdot t \quad (12)$$

Käyttämällä lausekkeita 11 saadaan amplitudi muotoon

$$X = \sqrt{x_0^2 + \frac{v_0^2}{\omega_n^2}} \text{ tai } X = \sqrt{x_0^2 + \frac{m \cdot v_0^2}{k}} \quad (13)$$

(Kärkkäinen.)

**Jäykästi tuetun palkin värähtely.** Seuraavassa tarkastellaan jäykästi tuetun ulokepalkin vapaata värähtelyä esimerkin avulla.



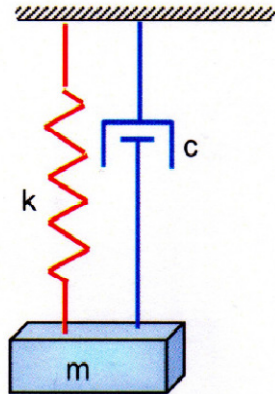
Kuvio 4. Ulokepalkin värähtely (Kärkkäinen).

Kuvion 4 mukaisessa kuormitusilanteessa taipuma  $\Delta$  saadaan lausekkeella

$$\Delta = \frac{m \cdot g \cdot l^3}{3 \cdot E \cdot I} . \text{ Soveltamalla kaavoja 9 saadaan } \omega_n = \sqrt{\frac{g}{\Delta}} = \sqrt{\frac{3 \cdot E \cdot I}{g \cdot l^3}} . \text{ (Kärkkäinen.)}$$

### 2.3 Vapaa vaimennettu värähtely

Värähtelyn vaimentamiseen voidaan käyttää viskoosia vaimennusta, jonka perusominaisuus on vaimennusvoiman suora verrannollisuus nopeuteen. Viskoosina vaimennuksena voidaan riittävällä tarkkuudella pitää nesteen aiheuttamaa kitkaa. (Kärkkäinen.)



Kuvio 5. Vapaa vaimennettu värähtely (Kärkkäinen).

Kuvio 5 esittää vapaata vaimennettua värähtelyä, jossa mukana on jousivakio  $k$  ja massa  $m$ . Lisäksi mukaan on tuotu myös vaimennusvoima  $c$ . Koska vaimennusvoima on suoraan verrannollinen nopeuteen, niin merkitsemällä vaimennusvoima  $F_d = c \cdot \frac{dx}{dt}$  saadaan kuvan merkinnöin

$$m \cdot \frac{d^2x}{dt^2} + c \cdot \frac{dx}{dt} + k \cdot x = 0 \quad (14)$$

Kun kaava 14 jaetaan massalla, päädytään muotoon

$$\frac{d^2x}{dt^2} + \frac{c}{m} \cdot \frac{dx}{dt} + \frac{k}{m} \cdot x = 0 \quad (15)$$

Kaava 15 on vapaan vaimennetun värähtelyn perusyhtälö. Tämä toisen kertaluvun homogeenisen vakiokertoimisen yhtälön ratkaisemiseksi tehdään yrite  $x = e^{\lambda t}$ , jossa  $\lambda$  on vakio. Näin saadaan karakteristinen yhtälö

$$\lambda^2 + \frac{c}{m} \cdot \lambda + \frac{k}{m} = 0 \quad (16)$$



josta seuraa

$$\lambda = -\frac{c}{2 \cdot m} \pm \sqrt{\left(\frac{c}{2 \cdot m}\right)^2 - \frac{k}{m}} \quad (17)$$

Tällöin yhtälön 17 yleinen ratkaisu voidaan kirjoittaa muotoon

$$x = A \cdot e^{\gamma_1 \cdot t} + B \cdot e^{\gamma_2 \cdot t} \quad (18)$$

Tutkitaan seuraavaksi lausekkeen 16 determinanttia  $\left(\frac{c}{2 \cdot m}\right)^2 - \frac{k}{m} = 0$

Tätä sanotaan kriittiseksi vaimennukseksi ja tällöin siis

$$c = c_{kr} = 2 \cdot \sqrt{k \cdot m} = 2 \cdot m \cdot \omega_n \quad (19)$$

Värähtelytekniikan oppikirjoissa käytetään usein niin sanottua suhteellista

vaimennuskerrointa  $\zeta$ , joka määritellään kun  $\zeta = \frac{c}{c_{kr}}$ , jolloin saadaan yhtälöä 19

käyttämällä yhteydet

$$c = 2 \cdot \zeta \cdot m \cdot \omega_n = 2 \cdot \zeta \cdot \sqrt{k \cdot m} \quad (20)$$

Nyt voidaan karakteristisen yhtälön 17 juuret kirjoittaa muotoon

$$\lambda_{12} = \left(-\zeta \pm \sqrt{\zeta^2 - 1}\right) \cdot \omega_n .$$

(Kärkkäinen.)

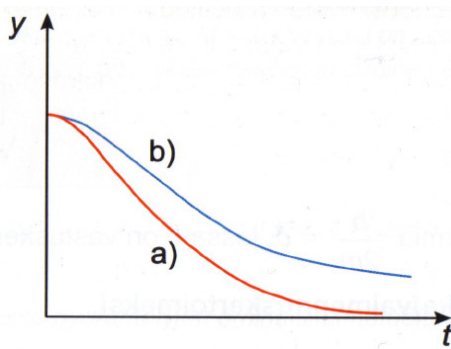
### 2.3.1 Aperioidinen tapaus

Aperioidinen tapaus tarkoittaa kun  $\zeta^2 - 1 > 0 \quad \Rightarrow \quad \zeta > 1 \quad \Rightarrow \quad c > c_{kr}$ . Tällöin kaavan 18 yleinen ratkaisu on muodoltaan

$$x = A \cdot e^{\left(-\zeta + \sqrt{\zeta^2 - 1}\right) \cdot \omega_n \cdot t} + B \cdot e^{\left(-\zeta - \sqrt{\zeta^2 - 1}\right) \cdot \omega_n \cdot t} \quad (21)$$

(Kärkkäinen.)

Aperioidisessa tapauksessa vaimentava voima on niin suuri, että mitään värähtelyä ei tapahdu, vaan värähtelijä lähestyy hitaasti tasapainoasemaa. Tätä voidaan havainnollistaa kuviossa 6, jossa käyrä b) kuvaa aperioidista tapausta. (Peltonen ym. 2004, 76.)



Kuvio 6. Aperioidisesti ja kriittisesti vaimennettu värähtely (Peltonen ym. 2004, 76).

### 2.3.2 Kriittinen tapaus

Kriittinen tapaus tarkoittaa kun  $\zeta^2 - 1 = 0 \Rightarrow \zeta = 1 \Rightarrow c = c_{kr}$ . Tällöin yhtälön 18 ratkaisu on muotoa

$$x = (A + B \cdot t) \cdot e^{-\omega_n \cdot t} \quad (22)$$

Käyttämällä alkuehtoja  $x = x_0$  ja  $\frac{dx}{dt} = v_0$ , kun  $t = 0$  saadaan

$$x = \left(x_0 + \left(\frac{v_0}{\omega_n} + x_0\right) \cdot \omega_n \cdot t\right) \cdot e^{-\omega_n \cdot t} \quad (23)$$

(Kärkkäinen.)

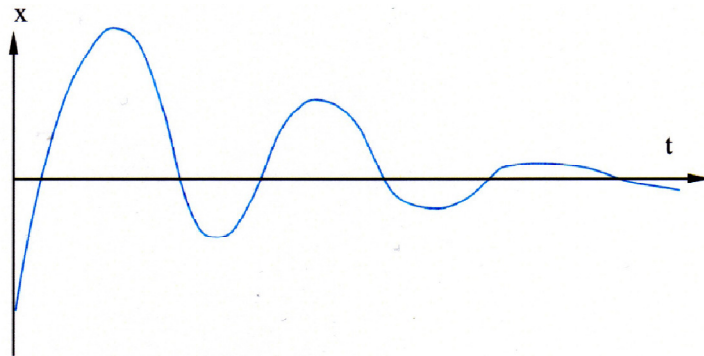
Vaimennus on kriittinen, kun värähtelijä palaa nopeimmalla mahdollisella tavalla tasapainoasemaansa ilman mitään värähtelyä. Tätä voidaan havainnollistaa kuviossa 6, jossa käyrä a) kuvaa kriittisesti vaimennettua värähtelyä. (Peltonen ym. 2004, 76.)

### 2.3.3 Alikriittinen tapaus

Alikriittinen tapaus tarkoittaa kun  $\zeta^2 - 1 < 0 \Rightarrow \zeta < 1 \Rightarrow c < c_{kr}$ , jolloin karakteristisen yhtälön juuret ovat tässä tapauksessa  $\lambda_{12} = \left(-\zeta \pm i \cdot \sqrt{1 - \zeta^2}\right) \cdot \omega_n$  ja yleinen ratkaisu on muodoltaan

$$x = X \cdot e^{-\zeta \cdot \omega_n \cdot t} \cdot \sin\left(\sqrt{1 - \zeta^2} \cdot \omega_n \cdot t + \varphi\right) \quad (24)$$

Lausekkeen 24 perusteella havaitaan, että amplitudi, joka on  $X \cdot e^{-\zeta \cdot \omega_n \cdot t}$ , pienenee jatkuvasti. Tällä tarkoitetaan sitä että liike on alikriittisessä tapauksessa kuvion 7 mukainen.



Kuvio 7. Aikajaksollinen liike (Kärkkäinen).

Liike ei enää ole harmonista, mutta kylläkin aikajaksollista ja sille saadaan jaksoksi

$$T_d = \frac{2 \cdot \pi}{\sqrt{1 - \zeta^2} \cdot \omega_n} \quad (25)$$

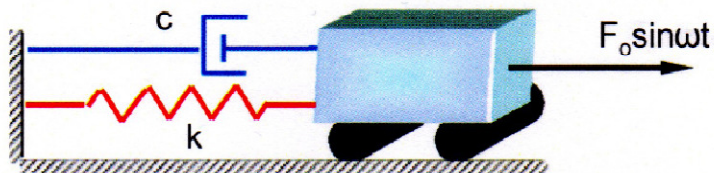
Koska vaimentamattoman värähtelyn jakso  $T = \frac{2\pi}{\omega_n}$ , saadaan

$$T_d = \frac{T}{\sqrt{1-\zeta^2}} \quad (26)$$

(Kärkkäinen)

## 2.4 Jaksollinen vaimennettu pakkovärähtely

Pakkovärähtely on värähtelyä, jossa värähtelyjen energiaa ylläpidetään jonkin ulkopuolisen tekijän aiheuttaman voiman avulla (Peltonen ym. 2004, 77).



Kuvio 8. Vaimennettu pakkovärähtely (Kärkkäinen).

Puuttumatta matemaattiseen käsittelyyn, joka on hyvin samanlainen kuin edellisissä tapauksissa, saadaan kuviossa 8 esitetylle systeemille liikeyhtälö

$$m \cdot \frac{d^2x}{dt^2} + c \cdot \frac{dx}{dt} + k \cdot x = F_0 \cdot \sin \omega \cdot t \quad (27)$$

Liikeyhtälön ratkaisu on muotoa

$$x = \frac{F_0}{(k-m\omega^2)^2+c\omega^2} \cdot \sin(\omega \cdot t + \varphi) \quad (28)$$

Sovitaan seuraavat merkinnät

$X_0 = \frac{F_0}{k}$  on pakkovoiman aikaansaama staattinen poikkeama

$$X = \frac{F_0}{(k - m \cdot \omega^2)^2 + c \cdot \omega^2} \quad \text{on pakkoliikkeen amplitudi}$$

$$r = \frac{\omega}{\omega_n} \quad \text{on taajuussuhde, joka ilmoittaa vapaan ja} \\ \text{pakkovärähtelyn ominaiskulmataajuuksien suhteen.}$$

Pakkovärähtelyn ja vapaan värähtelyn amplitudien suhteelle saadaan laskemalla lauseke

$$\frac{X}{X_0} = \frac{1}{\sqrt{(1-r^2)^2 + (2\zeta \cdot r)^2}} \quad (29)$$

Lauseketta 29 sanotaan suurennuskertoimeksi ja se ilmoittaa, moniko kertaiseksi staattinen poikkeama kasvaa harmonisen pakkovoiman vaikutuksesta. Jos lausekkeessa  $r = 1$ , siis  $\omega = \omega_n$  ja systeemin vaimennus  $\zeta$  on lisäksi pieni, kasvaa staattinen poikkeama tällöin vaarallisen suureksi, sillä lausekkeen nimittäjä lähtee nollaa. Ilmiötä kutsutaan resonanssiksi ja sen syntymahdollisuus on aina otettava huomioon rakenteiden suunnittelussa. (Kärkkäinen.)

## **3 VÄRINÄNVAIMENTIMET**

### **3.1 Värinvaimentimet yleisesti**

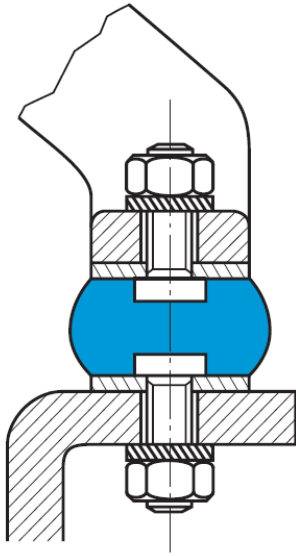
Värinänvaimentimien tarkoitus on vaimentaa ja vähentää vaimennettavan kohteen liiallista värinää. Vaimentimia on useisiin erilaisiin käyttökohteisiin ja -ympäristöihin. Vaimentimia on olemassa sekä paikallaan oleviin että liikkuviin kohteisiin. Käyttökohteita voivat olla muun muassa pumpput, tuulettimet, ilmastointilaitteet, muuntajat ja sähkökeskukset (Paulstra värinänvaimentimet 2005, 14). Vaimentimien valintaan ja käyttötilanteisiin liittyviin asioihin tutustutaan tarkemmin luvuissa 3.4.1 Paulstradyn-vaimentimien valinta valintataulukosta sekä 3.5.1 Radiaflex-vaimentimien valinta valintataulukosta. Aluksi tarkastellaan värinänvaimentimien kuormitustilanteisiin liittyvää teoriaa luvussa 3.2 värinänvaimentimien kuormitustilanteet.

### **3.2 Värinänvaimentimien kuormitustilanteet**

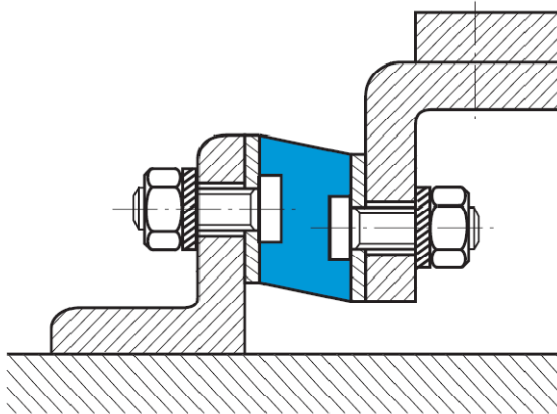
Värinänvaimentimia on olemassa aksiaaliselle ja radiaaliselle kuormitustilanteelle. Kuormitustilanteessa vaimentimeen kohdistuu vaimennettavan kohteen massan suuruinen paino eli kuorma. Seuraavassa tarkennetaan mitä aksiaalisella ja radiaalisella kuormitustilanteella tarkoitetaan.

Aksiaali- eli puristussuuntaisessa kuormitustilanteessa vaimentimeen kohdistuu kuorma ylhäältä alaspäin. Vaimentimen ollessa aksiaalisuuntaisessa kuormitustilanteessa on vaimennin asennettu käyttöympäristöön tällöin vaakasuoralle tasolle kuvion 9 mukaisesti. (Paulstra värinänvaimentimet 2005, 13.)

Radiaali- eli leikkaus- eli säteittäissuuntaisessa kuormitustilanteessa vaimentimeen kohdistuu sivuttaissuuntainen kuorma. Vaimennin on asennettu käyttöympäristöön tällöin pystysuoralle tasolle kuvion 10 mukaisesti. (Paulstra värinänvaimentimet 2005, 13.)



Kuvio 9. Aksiaali- eli puristussuuntainen kuormitus tilanne (Paulstra värinänvaimentimet 2005, 13).



Kuvio 10. Radiaali- eli leikkaussuuntainen kuormitus tilanne (Paulstra värinänvaimentimet 2005, 13).

### 3.3 Yleistä asiaa värinänvaimentimien valinnasta

Tässä luvussa kerrotaan yleisesti värinänvaimentimien valinnasta asennuskohteeseen. Yksityiskohtaisemmin vaimentimien valintaan liittyviin asioihin sekä vaimentimien valintataulukoon perehdytään luvuissa 3.4.1 Paulstradyn-vaimentimien valinta valintataulukosta sekä 3.5.1 Radiaflex-vaimentimien valinta valintataulukosta. Paulstradyn- ja Radiaflex-vaimentimet valittiin käytettäväksi värinänmittauksessa, jossa testattiin vaimentimien vaikutusta, kun sähkökeskusta vedettiin pumppukärryjen päällä.

Värinänvaimentimia valittaessa on otettava huomioon, minkälainen kuormitustilanne asennuskohteeseen eli vaimennettavaan laitteeseen kohdistuu. Kuormitustilanne voi olla aksiaalinen, radiaalinen tai niiden yhdistelmä (Paulstra värinänvaimentimet 2005, 10). Kuormitustilanne riippuu vaimennettavan kohteen eli esimerkiksi sähkökeskuksen asennosta, painosta ja painopisteestä. Värinänvaimentimien valintaa helpottavat vaimenninvalmistajien tuoteluetteloista löytyvät vaimenninkohtaiset valintataulukot, joista vaimentimet voidaan valita kuormituksen mukaan. Kuormitustilanne voi olla aksiaalisen ja radiaalisen yhdistelmä esimerkiksi pystysuoraan asennetussa sähkökeskuksessa, jonka kiinnitys tapahtuu sekä keskuksen pohjasta että seinästä.

Erityyppisiä vaimentimia voidaan myös yhdistellä. Tällä tarkoitetaan sitä että esimerkiksi sähkökeskuksen kiinnitykseen voidaan käyttää yhtä vaimennintyyppiä seinälle ja toista vaimennintyyppiä alareunalle lattiatasoon. Näin voidaan tehdä, jos värähtelyt ovat erilaisia eri suunnissa. Yleisimmin yhdistellään saman vaimenninsarjan eri kokoja kuormituksen mukaan. (Heiskanen [Viitattu 2.3.2011].)



### 3.4 Paulstradyn-värinänvaimennin

Kuviossa 11 oleva Paulstradyn-värinänvaimennin on vaimennintyyppi, joka on ominaisuuksiltaan tarkoitettu puristus eli aksiaalisuuntaiseen kuormitustilanteeseen. Vaimennin on asennettava tällöin vaakasuoralle tasolle. Paulstradyn-vaimentimelle on ominaista, että vakiokorkeus pysyy samana koko kuormitusalueella. Vakiokorkeuteen liittyvään teoriaan tutustutaan tarkemmin luvussa 3.4.1 Paulstradyn-vaimentimen valinta valintataulukosta. Käyttöalueiltaan vaimennin soveltuu sekä paikallaan olevien kohteiden että pyörivien koneistojen värinänvaimennuksiin. (Paulstra värinänvaimentimet 2005, 14.)



Kuvio 11. Paulstradyn-värinänvaimennin (Paulstra värinänvaimentimet 2005, 14).

#### 3.4.1 Paulstradyn-vaimentimen valinta valintataulukosta

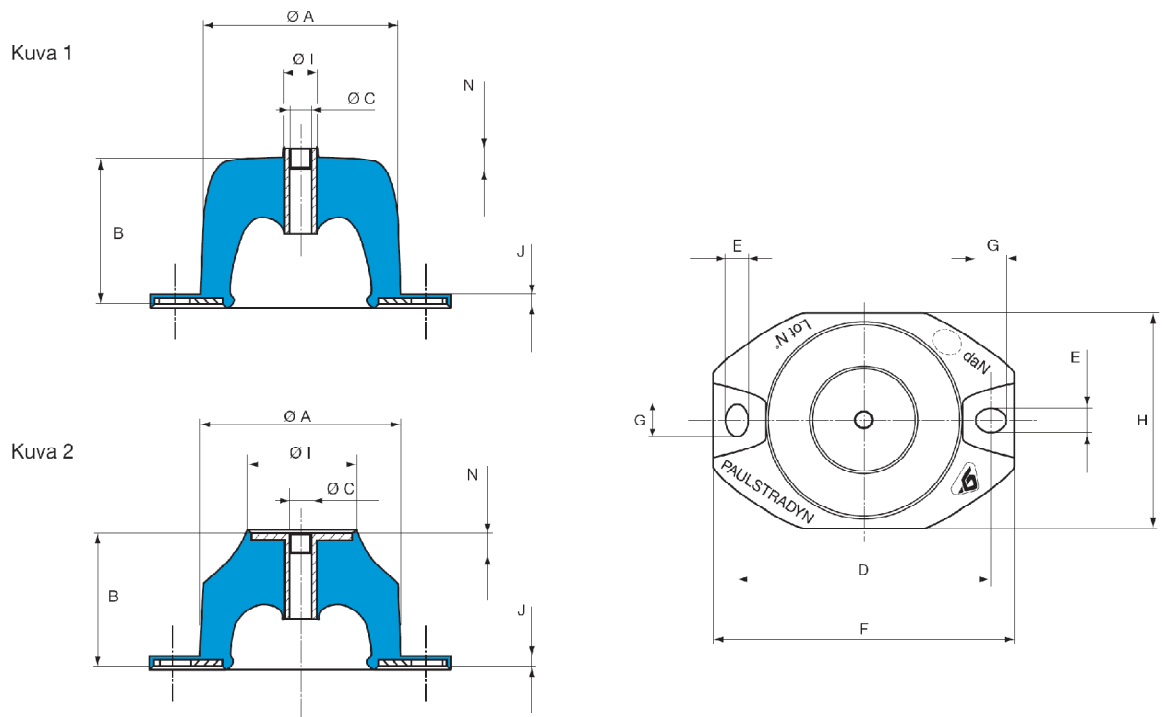
Tässä luvussa tutustutaan kuviossa 12 esitettyyn Paulstradyn-värinänvaimentimien valintataulukkoon, sekä siihen miten värinänvaimentimet valitaan valintataulukosta käyttökohteen mukaan. Aluksi käydään läpi valintataulukossa olevia käsitteitä.

Värinänvaimentimien valintataulukossa jokaisella vaimenninmallilla on tietyn suuruisen nimelliskuorma. Nimelliskuormalla tarkoitetaan yhden vaimentimen päälle kohdistuvaa suositeltavaa kuormaa. Nimelliskuorman yksikkö on voiman yksikkö.

Voiman yksikkö on N, Newton. 1 Newtonin voima vastaa 0,1 kilogramman kuormaa vaimentimen päällä.

Valintataulukossa viitataan staattiseen nimelliskuormaan aksiaalkuormituksessa. Staattinen nimelliskuorma aksiaalkuormituksessa tarkoittaa pysyvää kuormaa vaimentimen päällä, johon kohdistuu ylhäältä alaspäin kohdistuva kuormitustilanne (puristus). Valintataulukossa jokaiselle vaimenninmallille on annettu vaimentimen fyysiset mitat. Taulukossa viitataan vaimentimen korkeuteen (mitta B) kuormittamattomassa ja kuormitetussa tilanteessa. Paulstradyn-värinänvaimentimilla on vaimentimen mallista riippumatta sama vakiokorkeus koko kuormitusalueella. Vaimentimen korkeus on kuormittamattomana 40 mm ja kuormitettuna 32 mm. Korkeus kuormittamattomana tarkoittaa vaimentimen korkeutta, kun vaimentimen päälle ei kohdistu minkäänlaista kuormaa. Korkeus kuormitettuna tarkoittaa vaimentimen korkeutta, kun vaimentimen päälle kohdistuu nimelliskuorman suuruinen paino. (Paulstra värinänvaimentimet 2005, 14–15.)

Oikeanlaista vaimenninta valittaessa on tiedettävä, minkä painoinen on sähkökeskus, johon vaimentimet on tarkoitus asentaa. Sähkökeskuksen kokonaispaino jaetaan vaimentimien lukumäärällä. Otetaan esimerkki tilanteesta ja valitaan esimerkin mukaiseen sähkökeskukseen sopiva vaimennintyyppi värinänvaimentimien valintataulukosta. Esimerkkinä oleva sähkökeskus painaa yhteensä 84 kg. Sähkökeskukseen suunnitellaan värinänvaimentimet asennettavaksi siten että ne tulevat sähkökeskuksen alle jokaiseen kulmaan. Lukumäärällisesti vaimentimia tarvitaan sähkökeskuksen alle neljä kappaletta. Kun keskuksen kokonaispaino jaetaan neljällä, saadaan yhteen vaimentimeen kohdistuvan painon suuruudeksi 21 kg. Tutkitaan nyt vaimentimien valintataulukosta esimerkkiin parhaiten soveltuva värinänvaimennin. Värinänvaimentimien valintataulukosta nähdään, että lähimmäksi vaimentimen nimelliskuormaa päästään Paulstradyn 533704 -vaimentimella. Paulstradyn 533704 -värinänvaimentimen nimelliskuorma on suuruudeltaan 200 N eli 20 kg. Nimelliskuorman ja todellisen kuorman välillä eroa on siis vain 1 kg.



Malli	Tuote- numero	Nimellis- kuorma <sup>1)</sup> (N)	Kuva	Mitat (mm)											
				Ø A	B <sup>2)</sup>	Ø C	D	E	F	G	H	Ø I	J	N	
Paulstradyn 4 7 12	533 701	40	1	40	40	M6	52	6,2	64	6,2	44	12	2,5	6	
	533 702	70													
	533 703	120													
Paulstradyn 20 30 50	533 704	200	2	60	40	M6	76	6,2	90	8,2	64	32	2,5	12	
	533 705	300													
	533 706	500													
Paulstradyn 70 100 130	533 707	700	2	80	40	M8	100	8,2	122	12,2	84	48	2,5	12	
	533 708	1000													
	533 709	1300													
Paulstradyn 160 200 260	533 710	1600	2	100	40	M10	124	10,2	152	16,2	104	68	3	10	
	533 711	2000													
	533 712	2600													
Paulstradyn 325 400 500	533 713	3250	2	150	40	M12	182	12,2	214	20,2	154	116	4,5	10	
	533 714	4000													
	533 715	5000													
Paulstradyn 640 820 1050 1350	533 716	6400	2	200	40	M16	240	14,2	280	24,2	204	159	5,5	20	
	533 717	8200													
	533 718	10500													
	533 719	13500													

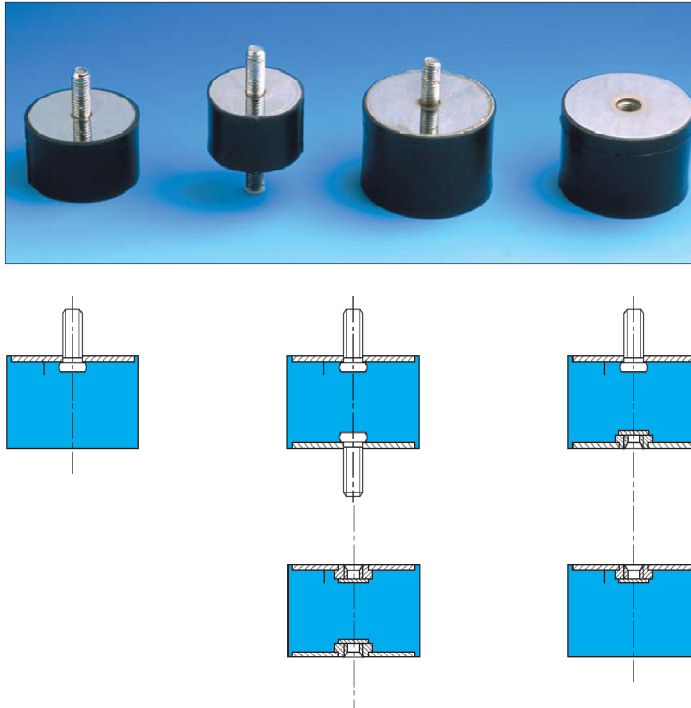
<sup>1)</sup> Staattinen nimelliskuorma aksiaalikuormituksessa.

<sup>2)</sup> Korkeus kuormittamattomana 40 mm, kuormitettuna 32 mm

Kuvio 12. Paulstradyn-värinänvaimentimien valintataulukko (Paulstra värinänvaimentimet 2005, 15).

### 3.5 Radiaflex-väriinänvaimennin

Radiaflex-väriinänvaimennin on vaimennintyyppi, joka ominaisuuksiltaan soveltuu sekä aksiaalisuuntaiseen että radiaalisuuntaiseen kuormitustilanteeseen. Tämä tarkoittaa sitä, että vaimennin voidaan asentaa vaaka- tai pystysuoralle tasolle. Radiaflex-väriinänvaimentimen aksiaalinen jäykkyys on suurempi kuin radiaalinen jäykkyys. Radiaflex-vaimentimia on saatavilla viidellä erilaisella kiinnitysvaihtoehdolla (kuvio 13). Kiinnitysvaihtoehtoja ovat esimerkiksi kiinnitys kierrepultein tai kierreisiin. Kiinnitys voi olla myös sekakiinnitys, joka on yhdistelmä kierrepultein ja kierreisiin kiinnitettävästä vaimentimesta. (Paulstra väriinänvaimentimet 2005, 10.)



Kuvio 13. Radiaflex-väriinänvaimentimia on saatavilla useilla eri kiinnitysvaihtoehdoilla (Paulstra väriinänvaimentimet 2005, 10).



Kuvio 14. Kierrepulttikiinnitteinen Radiaflex-värinänvaimennintyyppi.

### 3.5.1 Radiaflex-vaimentimen valinta valintataulukosta

Tässä luvussa tutustutaan Radiaflex-värinänvaimentimien valintataulukkoon, sekä siihen miten värinänvaimentimet valitaan valintataulukosta käyttökohteen mukaan. Kuten edellä kerrottiin, Radiaflex-vaimentimia on saatavilla viidellä erilaisella kiinnitysvaihtoehdolla. Jokaisella kiinnitysvaihtoehdoiltaan erilaisella vaimennintyyppillä on oma valintataulukko, josta vaimennin voidaan valita. Kuitenkin kaikkien eri valintataulukkojen sisältö on pääpiirteiltään samanlainen. Eroavaisuuksia tulee lähinnä vaimentimien kiinnityksiin liittyvissä mitoituksissa vaimentimien erilaisista kiinnitystavoista johtuen. (Paulstra värinänvaimentimet 2005, 10.)

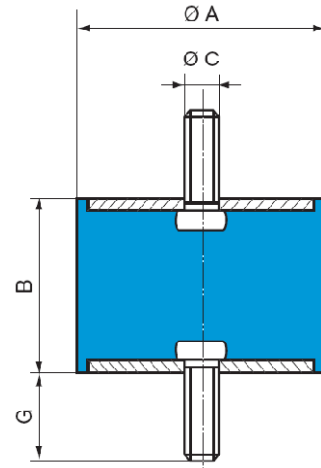
Värinämittaukseen, jossa sähkökeskusta vedettiin pumppukärkyjen päällä, valittiin kuvion 14 mukainen kierrepultein kiinnitettävä vaimennintyyppi. Tarkastelun kohteeksi otetaan näin kuviossa 15 esitetty kierrepultein kiinnitettävien vaimentimien valintataulukko. Radiaflex-vaimentimien valintataulukossa on kerrottu vaimentimen maksimikuorma. Maksimikuorma tarkoittaa suurinta sallittua kuormaa, joka vaimentimeen voidaan kohdistaa. Valintataulukossa on puristus- sekä leikkauskuormalle omat sarakkeensa. Maksimikuorman yksikkö valintataulukossa on Newton, N.

Otetaan esimerkiksi kuviossa 14 esitetty vaimennintyyppi, joka valittiin värinämittaukseen, jossa sähkökeskusta vedettiin pumppukärkyjen päällä. Kyseisessä mittauksessa käytettiin Radiaflex-vaimenninta, jonka tuotenumero on 521310. Kysei-

sen vaimennintyyppin maksimikuorma puristus eli aksiaalikuormituksessa on 800 N eli 80 kg. Saman vaimentimen leikkaus eli radiaalikuormitus on 110 N eli 11 kg.

Ø A mm	B mm	Ø C mm	G mm	PURISTUS		LEIKKAUS*		Tuote- numero
				Maks. kuorma N	Pai- numa mm	Maks. kuorma N	Pai- numa mm	
12,5	10	M5	10	120	2	15	1,5	521 293
	15			100	3	25	2	521 128
	20			80	3,5	25	4	521 295
16	10	M4	10	200	1,5	25	1,5	521 650
	15				3		2	521 651
	10	M5	12	200	1,5	25	1,5	521 292
	15			200	3	25	2	521 294
	20			150	4	25	4	521 296
20	8,5	M6	16,5	400	0,6	50	1	521 178
	15			350	3	50	2,5	521 249
	20			300	4,5	50	3,5	521 297
	25			300	5,5	45	4,5	521 299
	30			250	7	45	4,5	521 319
25,5	10	M6	18	800	1,5	80	1,5	521 655
	15			600	2,5	80	2,5	521 656
	20			500	2	80	4	521 652
	30			500	7,5	80	6	521 653
	10	M8	20	800	1,5	80	1,5	521 340
	15			600	2,5	80	2,5	521 341
	22			500	4	80	4	521 251
	25			500	5,5	80	4,5	521 342
	30			500	7,5	80	6	521 343
30	15	M8	25	900	3	110	2,5	521 308
	22			800	5	110	4	521 310
	30			700	8	110	6	521 312
	40			600	9	110	7,5	521 314
	30			1500	6	200	5,5	521 181
40	40	M8	20	1200	10	200	7,5	521 657
	20			1600	4	200	3	521 450
	28	M10	25	1500	6	200	5,5	521 401
	35			1200	8	200	6,5	521 452
	40			1200	10	200	7,5	521 454
	45			1200	11	200	9	521 456
50	25	M10	25	3000	6	250	4,5	521 580
	35			2500	8	250	7	521 581
	45			1900	11	250	9	521 582
60	25	M10	25	4000	5	300	4,5	521 601
	36			3000	8	300	7	521 603
	45			2500	11	300	9	521 641
70	35	M10	25	4500	8	350	6,5	521 705
	50			3500	11	350	11	521 710
	70			3000	14	350	15	521 711
80	40	M12	28	6000	9	400	7	521 658
	30	M14	45	9500	7	400	5	521 803
	30			9500	7	400	5	521 840
	40			6000	9	400	7	521 841
	70			5000	17	400	15	521 842
100	40	M16	47	11000	8	600	7	521 908
	55			9000	12	600	10	521 909
	80			7500	19	600	17	521 910

\* Leikkausarvot on mitattu aksiaalikuormituksessa.



Kuvio 15. Kierrepultein kiinnitettävien Radiaflex-värinänvaimentimien valintataulukko (Paulstra värinänvaimentimet 2005, 11).

### 3.6 Värinänvaimentimien asennus

Seuraavassa tutustutaan yleisesti värinänvaimentimien asennustapoihin sekä asennusohjeisiin. Yksityiskohtaiset asennusohjeet ovat saatavilla jokaiselle vaimenninmallille vaimenninvalmistajien tuoteluetteloista. Värinänvaimentimien asennustavat ovat vaimentimilla yleisesti pääpiirteittään samantapaisia. Eniten eroavaisuuksia tulee erilaisten kuormitustilanteiden (aksiaalinen, radiaalinen) välillä. Värinänvaimentimen asennuksessa on tärkeää, että vaimennin asennetaan oikein sekä asennuksessa käytettäviä ohjeita noudatetaan. Vaimennin asennetaan tukevasti paikalleen vaimennettavaan kohteeseen. Vaimentimien asennusohjeissa on eri vaimenninmalleille ja -kokoluokille annettu suositeltavat kiristysmomentit. Kiinnittäessä vaimenninta ruuveilla on suositeltavaa käyttää ohjeiden mukaista kiristysmomenttia luotettavan vaimennuksen sekä vaimentimen pitkän käyttöiän takaamiseksi.

## 4 SÄHKÖKOMPONENTTIEN VÄRINÄNKESTOISUUDET

Hyllystöhissien ja siirtovaunujen sähkökeskuksissa ilmenneet värinät olivat aiheuttaneet sähkökomponenteissa vikaantumisia. Värinän vaimentamisen lisäksi tutkittiin myös sitä, millaisia kyseisissä sähkökeskuksissa käytettävien sähkökomponenttien värinänkestoisuudet ovat. Hyllystöhissien ja siirtovaunujen sähkökeskuksissa käytetään pääasiassa Siemensin valmistamia sähkökomponentteja. Sähkökomponenttien värinänkestoisuustietoja etsittiin ottamalla suoraan yhteyttä komponenttien jälleenmyyjiin sekä etsimällä tietoja komponenttien valmistajien internetsivuilta. Vertailun vuoksi tutkittiin muidenkin valmistajien vastaavien sähkökomponenttien värinänkestoisuusarvoja.

Sähkökomponenttien värinänkestoisuuksia testataan standardin mukaisilla värähtelytesteillä. Testeissä käytetään erilaisia taajuusalueita. Eri taajuusalueilla säädetään testattavaan sähkökomponenttiin kohdistuvan värähtelynvoimakkuuden suuruutta. Taajuuden yksikkö on hertsi, Hz. Testattavalle sähkökomponentille annetaan testeissä värinänkestoisuusarvo, joka tarkoittaa värähtelyä, jonka sähkökomponentin pitäisi vikaantumatta kestää. Sähkökomponenttien värinänkestoisuudet on ilmaistu komponenttivalmistajien tuoteluetteloissa painovoiman yksiköllä g. Kun mitattiin hyllystöhissin sekä pumppukärryjen päällä olevan sähkökeskuksen värähtelyitä, käytettiin yksikköä  $\text{m/s}^2$ . Eri yksiköiden muuntaminen onnistuu seuraavasti: painovoiman yksikkö  $g \approx 9,81 \text{ m/s}^2$ .

Taulukossa 1 on tietoja eri sähkökomponenttien värinänkestoisuusarvoista. ABB:n valmistama S200-sarjan johdonsuojakatkaisija on ominaisuuksiltaan samanlainen kuin Siemensin valmistama 5SX2-sarjan johdonsuojakatkaisija. Ominaisuuksiltaan keskenään samanlaisia ovat myös ABB:n valmistama F200-sarjan vikavirtasuojakytkin sekä Siemensin valmistama 5SM1312-0-sarjan vikavirtasuojakytkin. Värinänkestoisuudet tutkittavilla Siemensin komponenteilla vaihtelivat  $60 \text{ m/s}^2$  -  $84 \text{ m/s}^2$  välillä. Värinänkestoisuudet ABB:n johdonsuojakatkaisijalla ja vikavirtasuojakytkimellä olivat suuruudeltaan samanlaisia eli  $49 \text{ m/s}^2$ . Värinänkestoisuudet näillä komponenteilla olivat jonkin verran pienempiä kuin Siemensin vastaavanlaisilla komponenteilla. Värinänkestoisuus kaikilla taulukossa esitetyillä komponenteilla oli



hyvä. Komponenttien värinänkestoisuuksia analysoidaan kokonaisuudessaan tarkemmin vielä luvussa 7 johtopäätökset yhdessä värinänmittaustulosten kanssa. (Low- Voltage Controls and Distribution 2009; Laitinen [Viitattu 16.3.2010]; Miniature circuit breakers; Residual Current Devices.)

Taulukko 1. Komponenttien värinänkestoisuusarvoja.

Valmistaja	Komponentti	Komponentin malli	Testattu taajuusalueella	Värinänkestoisuus	
			Hz	g	m/s <sup>2</sup>
Siemens	Johdonsuojakatkaisija	5SX2	10 - 150	6	60
Siemens	Vikavirtasuojakytkin	5SM1312-0	10 - 150	8,5	84
Siemens	Turvarele	3KT28 30	5 - 500	8	78,5
Siemens	Apukosketin	5SX9100	10 - 150	6	60
ABB	Johdonsuojakatkaisija	S200	5 - 150	5	49
ABB	Vikavirtasuojakytkin	F200	5 - 150	5	49

## 5 VÄRINÄNMITTAUKSET

### 5.1 Larson Davis HVM 100 -mittauslaitteisto

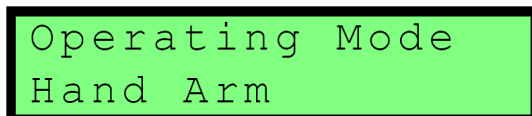
Mittauksessa käytettiin kuviossa 16 esitettyä Larson Davis HVM 100 -värähtelynmittauslaitteistoa. Mittarilla voidaan mitata kolmiakselisesti samanaikaisesti X-, Y- ja Z-akselien värähtelyä. Se suorittaa digitaalisen näytteenoton ja suodatukset. Mittarin käyttöominaisuuksia ovat muun muassa käsi- ja kehotärinämittaus, jolla mitataan esimerkiksi kulmahiomakoneesta käteen kohdistuvaa värinää. Mittari soveltuu ominaisuuksiltaan erinomaisesti myös sähkökeskuksen värinänmittauksiin. HVM 100 -mittauslaitteisto sisältää mittarin, mitta-anturin, sekä Blaze-ohjelmiston. Blaze-ohjelmistolla voidaan analysoida mittaustuloksia taulukkona sekä graafisena kuvaajana. (HVM 100 [Viitattu: 20.1.2010].)



Kuvio 16. Larson Davis HVM 100 -mittauslaitteisto antureineen (PCB Piezotronics Inc 2009).

## 5.2 Värinänmittaus Larson Davis HVM 100 -mittauslaitteistolla

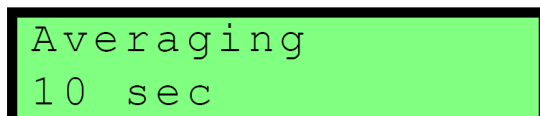
Ennen värinämittausten aloittamista täytyy värinämittarin asetusarvot säätää mittauksen sopivaksi. On myös varmistettava että mittarin kalibrointiasetukset ovat ajan tasalla. Värinämittarista valittiin näihin mittauksiin käytettäväksi käsitärinätoiminto (kuvio 17).



Operating Mode  
Hand Arm

Kuvio 17. Valitaan mittaustavaksi käsitärinä (PCB Piezotronics Inc 2009).

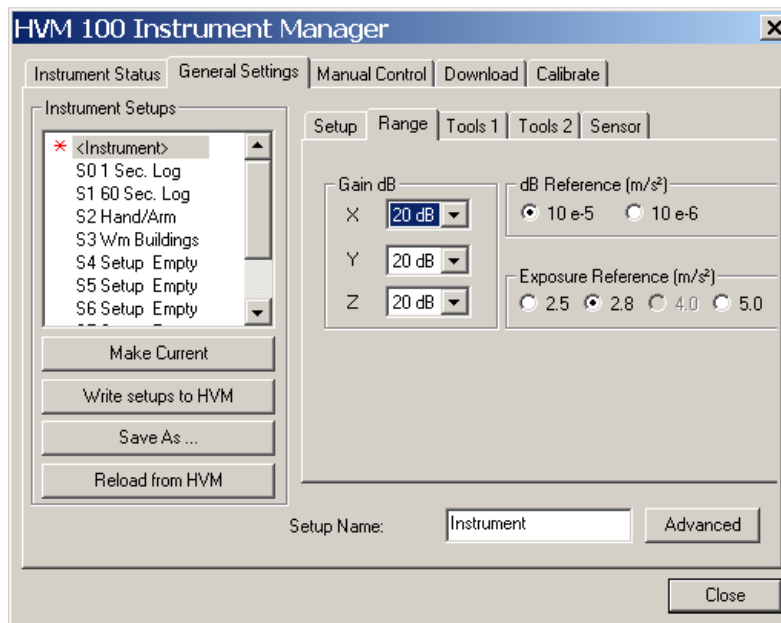
Mittauksissa valittiin värähtelyiden näytteenoton keskiarvoksi 10 sekuntia (kuvio 18). Näytteenoton keskiarvolla tarkoitetaan sitä aikaa, miten usein mittari tallentaa mitattavan värinäarvon mittaustuloksiin. Esimerkiksi näissä mittauksissa mittauservot tallentuivat joka 10 sekunnin välein. Mittarista säädetään myös mittausaika eli miten kauan värinää mitataan. Mittausaika on säädettävissä yhdestä minuutista aina 99 tuntiin. Mittausajan päätyttyä mittaustulos tallentuu mittarissa valittuun muistipaikkaan.



Averaging  
10 sec

Kuvio 18. Valitaan mittausvälien keskiarvoksi 10 sekuntia (PCB Piezotronics Inc 2009).

Ennen mittausta mittarin värähtelynherkkyysalue täytyy säätää mittaukseen sopivalle alueelle. Värähtelynherkkyydellä tarkoitetaan mittaasanturin mittausherkkyyttä. Värähtelynherkkyys ilmaistaan desibeliasteikolla. Värähtelynherkkyys on Larson Davis HVM 100 -mittauslaitteistossa säädettävissä 0 dB - 60 dB välillä. Värähtelynherkkyys ollessa 0 dB mittaasanturi mittaa hyvin voimakkaita värähtelyarvoja. Kun värähtelyherkkyys on säädetty 60 dB herkkyydelle, mittaasanturi mittaa hyvin heikkojakin värähtelyitä. Herkkyys on säädettävissä mitta-anturin X-, Y- ja Z-akseleille (kuvio 19). Värähtelymittauksissa käytettiin 20 dB:n tai 40 dB:n herkkyyttä. Eniten mittauksissa käytettiin 20 dB:n herkkyyttä, joka oli mittauksiin parhaiten soveltuva herkkyysalue.



Kuvio 19. Värähtelyherkkyyden säätö.

### 5.3 Hyllystöhissi korkeavarastojärjestelmässä

Korkeavarastojärjestelmä käsittää varastohyllyn, hyllystöhisin ja varastonhallintajärjestelmän. Varastohyllyssä on lavapaikkoja, jonne kuormalavat varastoidaan hyllystöhisin avulla. Korkeavarastojärjestelmässä on otto- ja jättöpaikkoja, joihin kuormalavat viedään tai joista ne haetaan esimerkiksi vihivaunulla. Hyllystöhissi hakee kuormalavan ottopaikasta vieden sen varastohyllyn lavapaikkaan, tai päinvastoin ottaen kuormalavan lavapaikasta ja vieden sen jättöpaikkaan. Hyllystöhisissä on taakankäsittelijänä haarukka, jolla kuormalavat saadaan kuljetettua. Kuviossa 20 on Pesmel Oy:ssä sijaitseva korkeavarastojärjestelmä, jossa on 246 lavapaikkaa 1400 kg lavoille. (Pesmelille oma korkeavaraston testi- ja koulutusympäristö 2010, 9 [Viitattu 12.11.2011].)

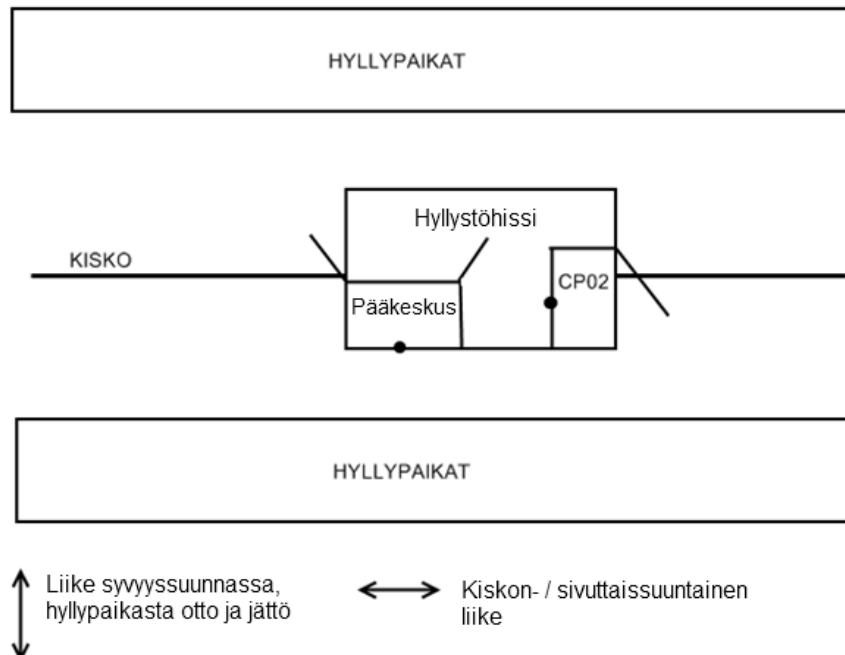


Kuvio 20. Pesmel Oy:ssä sijaitseva hyllystöhissi (Pesmelille oma korkeavaraston testi- ja koulutusympäristö 2010, 9).

#### 5.4 Väriänmittaukset hyllystöhissistä

Väriänmittaukset suoritettiin Pesmel Oy:ssä sijaitsevan korkeavarastojärjestelmän hyllystöhissistä. Mittaukset suoritettiin hyllystöhississä olevista kahdesta sähkökeskuksesta (kuvio 21). Aluksi mittauksia suoritettiin hyllystöhissin pääkeskuksesta. Sen jälkeen siirryttiin mittaamaan ohjauskeskukseen eli CP02-keskukseen kohdistuneita värinöitä. Kumpikin sähkökeskus oli kiinnitetty hyllystöhissin runkoon ilman värinänvaimentimia.

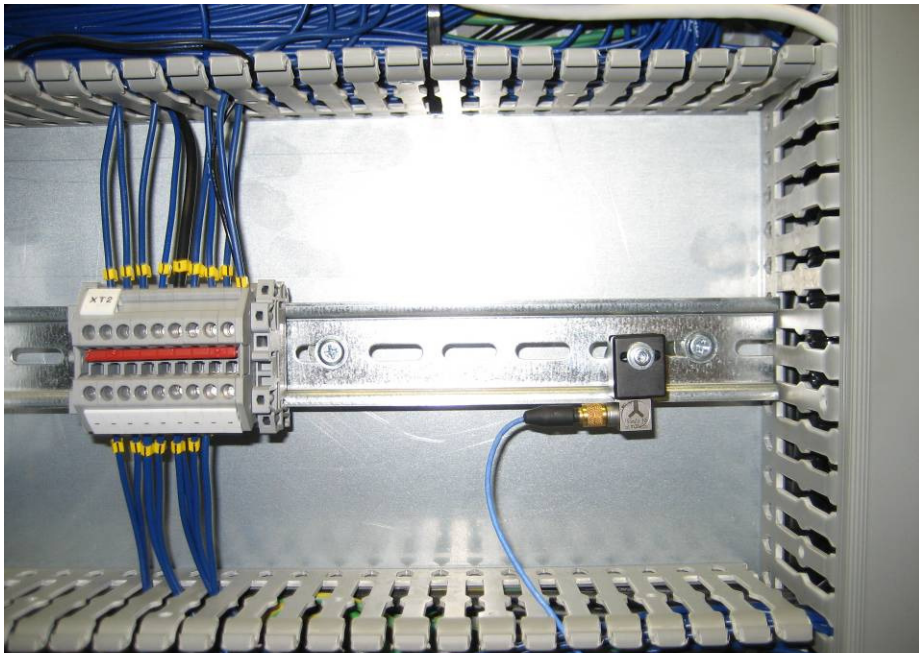
Mittauksissa hyllystöhissiä ajettiin sellaisella ajonopeudella, jolla hyllystöhissiä todellisessa käyttötilanteessakin ajetaan. Hyllystöhissi liikkui kiskoa pitkin edestakaisin. Samalla taakankäsittelijä liikkui sekä ylös- että alaspäin. Lisäksi taakankäsittelijä otti lavan hyllypaikasta vieden sen toiseen hyllypaikkaan. Näin mittaustilanne vastasi hyllystöhissin todellista käyttötilannetta.



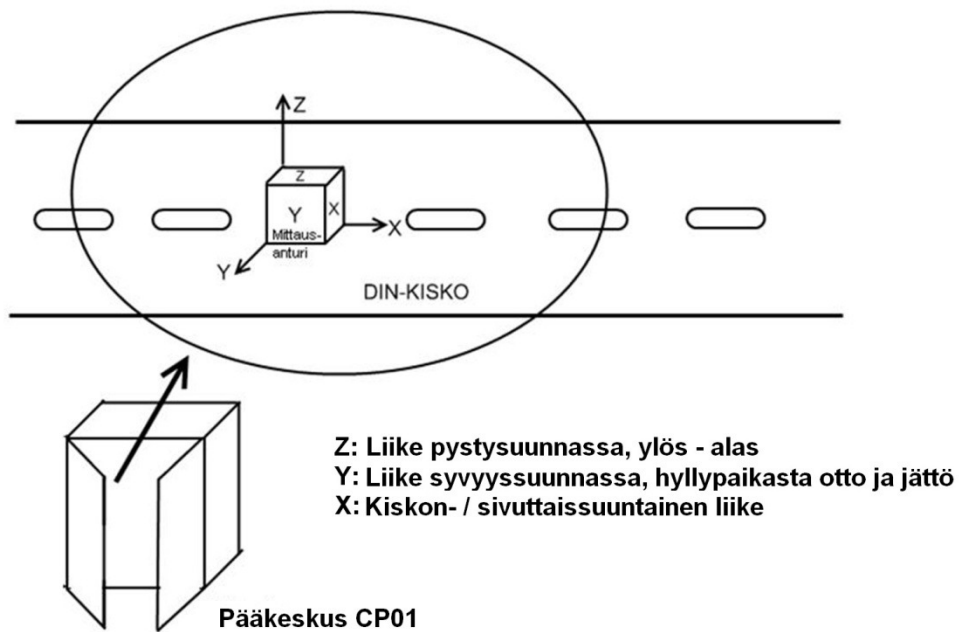
Kuvio 21. Korkeavarastojärjestelmän pohjapiirros.

#### 5.4.1 Mitta-anturin sijainti pääkeskuksessa

Väriinmittarin anturi sijoitettiin kuvion 22 mukaisesti hyllystöhissin pääkeskuksessa Din-kiskoon. Din-kisko oli kiinnitetty keskuksen pohjalevyyn metallisilla korokepaloilla. Mitta-anturia kiinnittäessä on huomioitava kuviossa 23 näkyvän anturin koordinaattien X-, Y- ja Z-akselien suunnat. Anturin koordinaatit kirjattiin ylös keskuksen kiinnitetystä anturista. Näin tiedetään anturin koordinaattien suunnat, kun mittaustuloksia lähdetään tulkitsemaan. Mitta-anturi sijoitettiin hyllystöhissin pääkeskuksessa seuraavanlaisesti: Z-akselin suuntainen liike mittaa pystysuuntaista liikettä, Y-akselin suuntaisella liikkeellä mitataan syvyysuuntaista liikettä (Hyllystöhissin lavan otto/jättö suuntainen liike). X-akselin suuntainen liike on korkeavarastojärjestelmän kiskon suuntaista liikettä, jossa hyllystöhissi liikkuu.



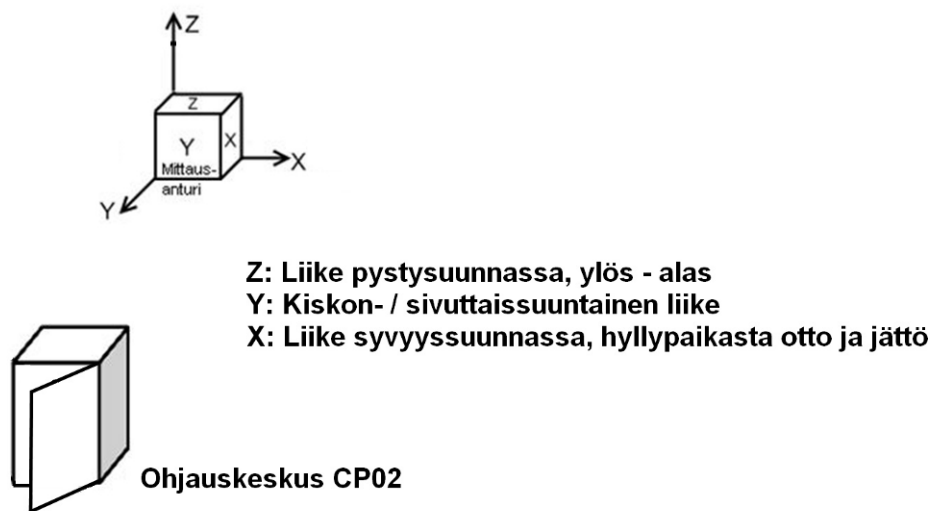
Kuvio 22. Värinämittarin anturi kiinnitettynä sähkökeskuksen Din-kiskoon.



Kuvio 23. Anturin koordinaattien suunnat hyllystöhissin pääkeskuksessa.

### 5.4.2 Mitta-anturin sijainti ohjauskeskuksessa

Hyllystöhissin ohjauskeskuksessa värinämittarin anturi kiinnitettiin suoraan keskuksen pohjalevyyn. Mitta-anturin koordinaatit sijoittuivat hyllystöhissin ohjauskeskuksessa kuvion 24 mukaisesti. Z-akselin suuntainen liike on pystysuuntaista liikettä, Y-akselin suuntainen liike on korkeavarastojärjestelmän kiskon suuntaista liikettä ja X-akselin suuntainen liike on sivuttaissuuntaista liikettä (Hyllystöhissin lavan otto/jätto suuntainen liike).



Kuvio 24. Anturin koordinaattien suunnat hyllystöhissin ohjauskeskuksessa.

## 5.5 Värinämittaukset pumppukärryjen päällä olevasta sähkökeskuksesta

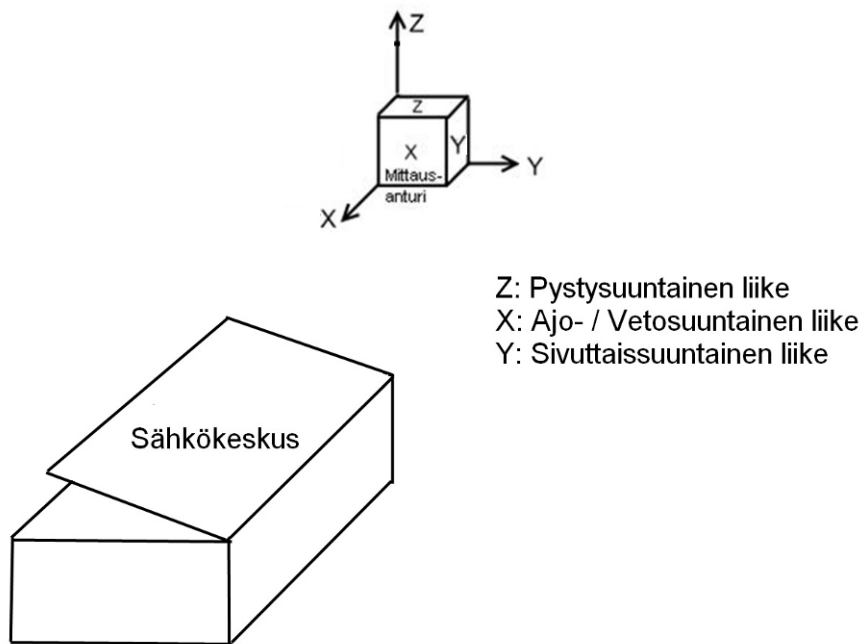
Seuraavissa mittauksissa sähkökeskusta vedettiin pumppukärryn päällä ja mitattiin keskukseen kohdistuneita värinöitä. Mittaukset suoritettiin betonilattialla. Pumppukärryjä vedettiin reippaalla kävelynopeudella ja kävelynopeus pyrittiin pitämään mahdollisimman tasaisena. Pumppukärryn päällä oli puinen kuormalava, johon sähkökeskus kiinnitettiin. Kuormalava painoi 19 kg, joka otettiin mittauksissa huomioon vähentämällä se kokonaismassasta. Sähkökeskus painoi yhteensä 60 kg. Mittauksissa käytettiin lisäpainoja, jotta sähkökeskuksen kokonaispainoa pystyttiin muuttamaan halutulla tavalla. Ensin mittaukset suoritettiin siten, että sähkökeskus oli kiinnitettynä suoraan kuormalavaan ilman vaimentimia. Sen jälkeen sähkökes-



kus kiinnitettiin kuormalavaan vaimentimien kanssa ja tehtiin mittaukset uudelleen. Vaimentimina käytettiin kahta erilaista värinänvaimennintyyppiä. Ensin sähkökeskusta testattiin Paulstradyn 533704 -vaimentimilla ja sen jälkeen Radiaflex 521310 -vaimentimilla.

### 5.5.1 Mitta-anturin sijainti sähkökeskuksessa

Värinämittarin anturi kiinnitettiin pumppukärryllä olevan sähkökeskuksen Din-kiskoon. Din-kisko oli kiinnitetty sähkökeskuksen pohjaan. Mitta-anturin koordinaattien suunnat mittauksissa olivat kuvion 25 mukaiset. Z-akselin suuntainen liike mittaa pystysuuntaan tapahtuvaa liikettä. X-akselin suuntainen liike on ajo-/vetosuuntaista liikettä. Ajo-/vetosuuntainen liike tarkoittaa kävelyn suuntaista liikettä, kun pumppukärryjen päällä olevaa sähkökeskusta vedettiin kävellen eteenpäin. Y-akselin suuntainen liike on sähkökeskuksen sivuttaissuuntaista liikettä.



Kuvio 25. Anturin koordinaattien suunnat pumppukärryllä olevassa sähkökeskuksessa.

### 5.5.2 Värinänmittaukset Paulstradyn-vaimentimilla

Kuviossa 26 olevan sähkökeskuksen alapuolelle kiinnitettiin neljä Paulstradyn 533704 -vaimenninta, eli yksi jokaiseen kulmaan. Yhden vaimentimen aksiaalinen nimelliskuorma on 20 kg. Alun perin 60 kg painavan keskuksen sisäpuolelle lisättiin neljä 6,13 kg painoista painoa. Painot lisättiin sähkökeskuksen jokaiseen kulmaan, jolloin kuorma jakaantui tasaisesti. Sähkökeskuksen kokonaispaino ensimmäisessä mittauksessa painojen kanssa oli tällöin 84,5 kg. Kuorma yhden vaimentimen päällä oli noin 21 kg eli hieman yli nimelliskuorman.

Seuraavaksi sähkökeskuksen painoa vähennettiin ottamalla kaikki lisäpainot pois. Näin sähkökeskuksen paino tässä mittauksessa oli 60 kg. Vaimentimina käytettiin edelleen Paulstradyn 533704 -vaimentimia, kuten edellisessä mittauksessa. Mittauksessa testattiin, miten painon vähentäminen vaikuttaa värinään. Kuorma vaimentimien päällä muuttui nyt kevyemmäksi eli yhteen vaimentimeen kohdistui 15 kg kuorma.



Kuvio 26. Sähkökeskus kiinnitettynä kuormalavaan Paulstradyn 533704 -värinänvaimentimilla.

### 5.5.3 Värinänmittaukset Radiaflex-vaimentimilla

Sähkökeskuksen alle kiinnitettiin neljä Radiaflex 521310 -värinänvaimenninta. Radiaflex-vaimentimet voidaan kiinnittää lattiaan eli vaakatasoon, sekä seinään eli pystysuoraan tasoon. Yhden vaimentimen aksiaalisuuntainen maksimikuorma on 80 kg. Yhden vaimentimen radiaalisuuntainen maksimikuorma on 11 kg. Näissä mittauksissa kiinnitettiin vaimentimet ainoastaan vaakasuoraan tasoon (kuvio 27), koska pystysuoraan tasoon kiinnittäminen olisi ollut hankala toteuttaa.

Aluksi suoritettiin mittaukset keskuksen kokonaismassan ollessa 84,5 kg. Yhteen vaimentimeen kohdistui suunnilleen 21 kg suuruinen kuorma. Kuorman suuruus oli näin ollen melko paljon maksimikuormaa pienempi. Seuraavaksi mittaukset toteutettiin huomattavasti suuremmalla kuormalla kuin edellisessä mittauksessa, ja sähkökeskukseen lisättiin lisäpainoja. Keskuksen painaessa nyt 149 kg on kuorma yhden vaimentimen päällä 37,25 kg. Kuorma vaimentimien päällä oli nyt huomattavasti lähempänä maksimikuormaa kuin edellisessä mittauksessa.



Kuvio 27. Sähkökeskus kiinnitettynä kuormalavaan Radiaflex 521310 -värinänvaimentimilla.

## 6 MITTAUSTULOSTEN ANALYSOINTI

### 6.1 Johdatus tulosten analysointiin

Mittaustuloksia voidaan tarkastella ja esittää Blaze-ohjelmistolla, johon mittaustulokset voidaan ladata mittarista. Blaze-ohjelmistossa mittaustuloksia voidaan esittää sekä taulukkona että graafisena kuvaajana. Mittayksikkönä mittauksissa käytettiin suuretta  $\text{m/s}^2$ . Värähtelyn huippuarvo tarkoittaa värähtelyä, joka on yhden mittauksen suurin värähtelyarvo.

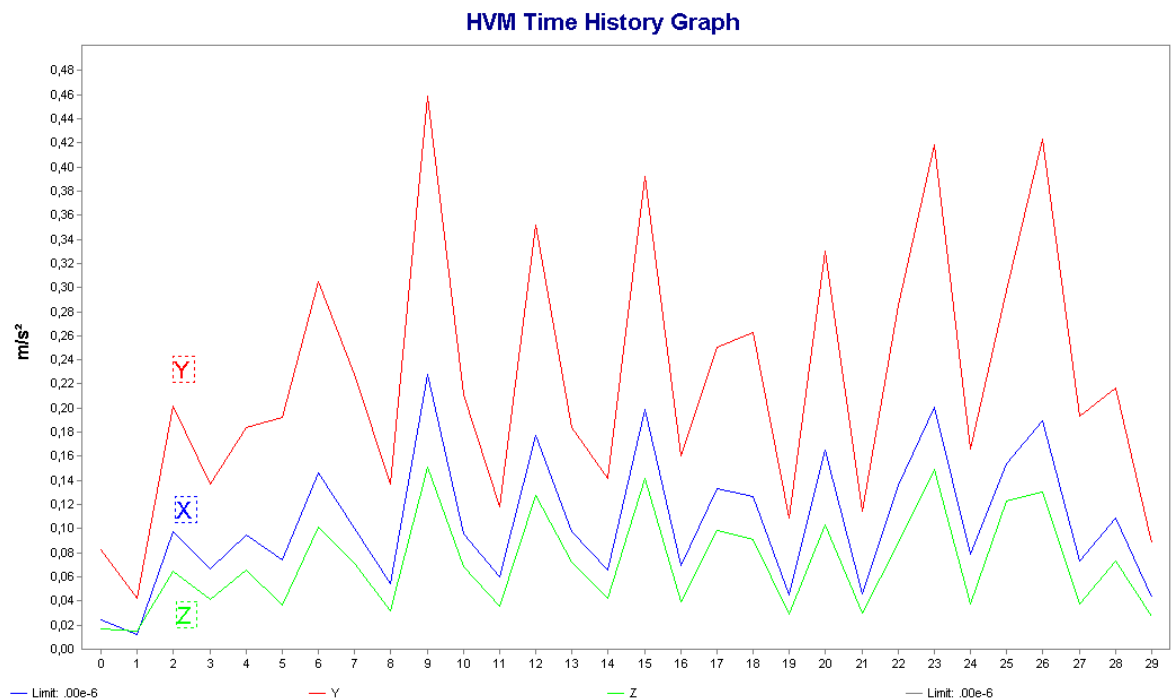
### 6.2 Tuloksien pohdintaa hyllystöhissin sähkökeskuksista

Hyllystöhissin värinänmittauksien ajatuksena oli tutkia, minkälaisia värinöitä hyllystöhissin sähkökeskuksissa normaalissa käyttötilanteessa esiintyy. Ennen mittauksia tutkittiin sähkökomponenttien värinänkestoisuuksia. Tutkitut komponentit olivat ominaisuuksiltaan samanlaisia kuin mittauksissa käytetyn hyllystöhissin sähkökeskuksissa olevat. Näin voidaan hyllystöhissistä saatuja värinänmittaustuloksia vertailla tutkittujen komponenttien värinänkestoisuuksiin. Mittaustuloksia analysoidaan luvuissa 6.2.1 mittaustulokset pääkeskuksesta ja 6.2.2. mittaustulokset ohjauskeskuksesta. Komponenttien värinänkestoisuuksia vertaillaan mittaustuloksiin luvussa 7 johtopäätökset.

#### 6.2.1 Mittaustulokset pääkeskuksesta

Kuviossa 28 esitetään pääkeskuksen värinänmittaustuloksia. Pääkeskuksen värinänmittauksissa Z-akselin eli pystysuuntaisen akselin värähtelyt olivat kaikkein vaimeimpia. Pystysuuntaan kohdistuneiden värähtelyiden huippuarvo Z-akselilla oli  $0,15 \text{ m/s}^2$ . X-akselin eli hyllystöhissin kiskon suuntaisen liikkeen värähtelyiden huippuarvo oli  $0,23 \text{ m/s}^2$ . Y-akselilla suurin yksittäinen huippuarvo oli  $0,46 \text{ m/s}^2$ . Y-

akselin suuntainen liike oli hyllystöhissin lavan otto/jättö suuntainen liike. Tuloksista voidaan huomata, että värähtelyt pääkeskuksessa olivat melko vaihtelevia.



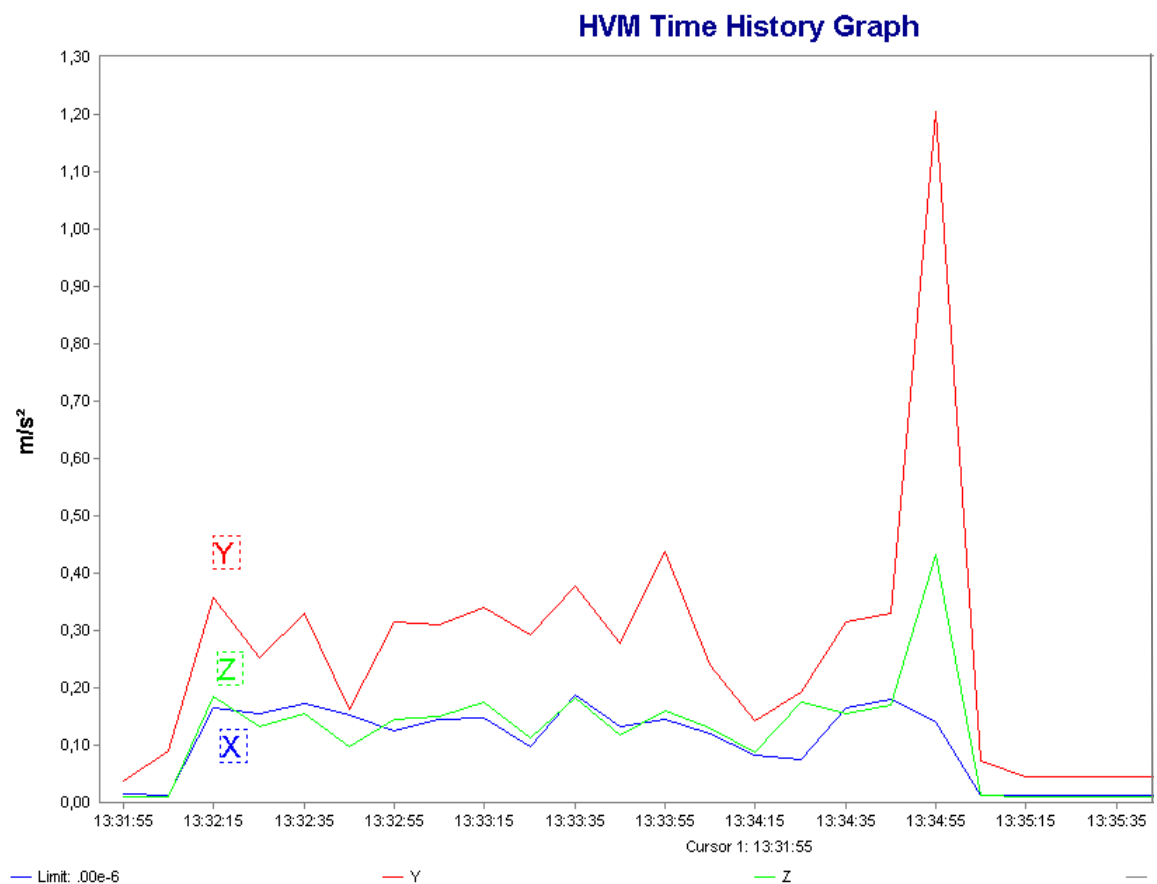
Kuvio 28. Värinänmittaus hyllystöhissin pääkeskuksesta.

## 6.2.2 Mittaustulokset ohjauskeskuksesta

Hyllystöhissin värinänmittauksissa suurimman värähtelyn sai aikaan se, kun hissi pysähtyi kokonaan täydestä vauhdista. Hyllystöhissi pysähtyi täysin odottamattomasti, eikä ehtinyt hidastamaan jarruttamalla nopeuttaan kuten normaalissa käyttötilanteessa. Mittaukset suoritettiin tällöin hyllystöhissin ohjaus- eli CP02-keskuksesta. Voimakkain värähtely tapahtui Y-akselin suuntaisesti. Y-akselin suuntainen värähtely oli hissin pysähtyessä voimakkaimmillaan  $1,20 \text{ m/s}^2$ . Y-akselin suuntainen liike ohjauskeskuksen mittauksissa oli hyllystöhissin kiskon suuntaista liikettä. Hyllystöhissi liikkui täyttä vauhtia kiskon suuntaisesti, kun se pysähtyi odottamattomasti. Hyllystöhissin vauhdin pysähtyessä kokonaan, Z-akselin eli pystysuuntaisen liikkeen värähtelyt olivat voimakkaimmillaan  $0,45 \text{ m/s}^2$ . X-akselin eli hyllystöhissin lavan otto/jättö suuntaisen liikkeen värähtelyihin hyllystöhissin pysähtyminen ei aiheuttanut minkäänlaista värähtelyn kasvua. Kuviosta

29 voidaan huomata, että hyllystöhissin pysähtyminen näkyy Y- ja X-akselin suuntaisissa värähtelyissä selvästi hetkellisenä värähtelyn nousuna.

Seuraavaksi tutkitaan kuvion 29 mittaustuloksista, minkälaisia värähtelyitä tapahtui ennen hyllystöhissin odottamatonta pysähtymistä. Ennen pysähdystä Y-akselin värähtelyn huippuarvo oli noin  $0,45 \text{ m/s}^2$  ja X- ja Z-akselien värähtelyn huippuarvot olivat noin  $0,18 \text{ m/s}^2$ . Värähtelyt ohjauskeskuksessakin olivat melko vaimeita, vaikka hyllystöhississä tapahtui normaalista käyttötilanteesta poikkeava tilanne. Tähän tutustutaan tarkemmin luvussa 7 johtopäätökset.



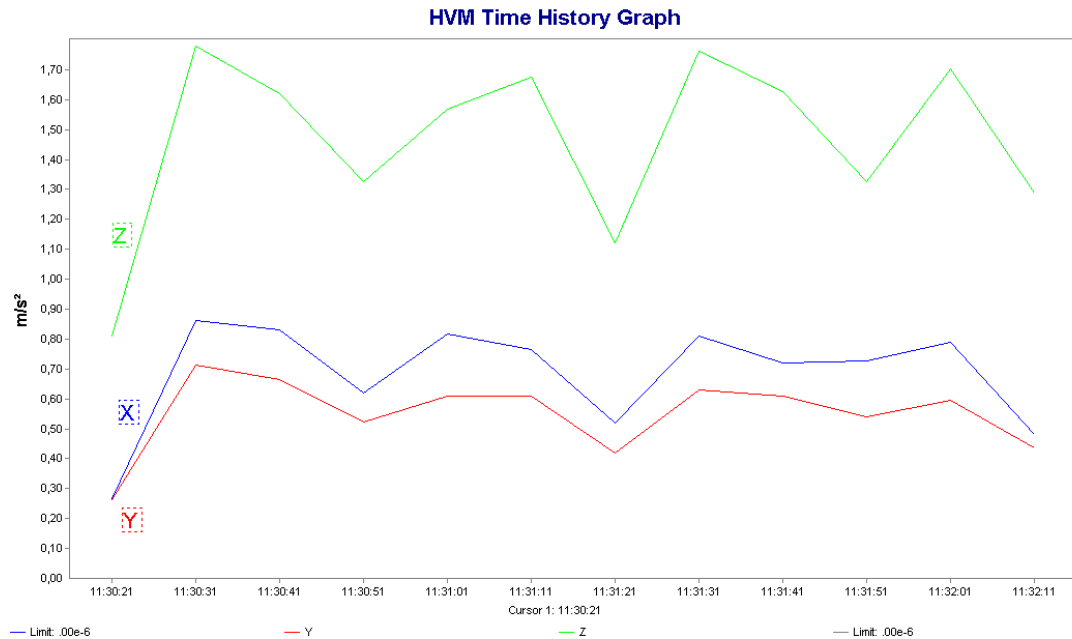
Kuvio 29. Värinänmittaus CP02-keskuksesta hyllystöhissin pysähtyessä täydestä vauhdista.

### 6.3 Tuloksien pohdintaa sähkökeskuksen ollessa pumppukärryjen päällä

Kun mitatut värinät hyllystöhississä todettiin melko vaimeiksi, niin pohdittiin sekä suunniteltiin millaisia uusia mittauksia voisi vielä suorittaa. Suunniteltiin, että sähkökeskusta voisi vetää pumppukärryjen päällä ja mitata keskukseen kohdistuneita värinöitä. Sähkökeskuksen värinänmittaukset suoritettiin sekä ilman vaimentimia että vaimentimien kanssa. Tällöin mittaustuloksista voidaan arvioida miten suuri vaikutus on sillä, onko keskukseen asennettu värinänvaimentimet vai onko keskus asennettu ilman värinänvaimentimia. Mittaustuloksista voidaan arvioida myös erisuuruisten kuormien vaikutusta värinänvaimentimien toimivuuteen. Mittausympäristönä oli tehdashallin betonilattia, jossa oli muutama selkeästi isompi epätasainen kohta, kuten lattian sauma. Näin mittauksiin saatiin riittävän paljon erilaisia värinänlähteitä. Mittaustuloksissa nämä epätasaiset kohdat voidaan nähdä selkeästi suurempana värähtelynä.

#### 6.3.1 Mittaustulokset sähkökeskuksen ollessa ilman vaimentimia

Sähkökeskuksen värinöitä mitattiin aluksi 60 kg painavalla keskuksella. Värinät ilman vaimentimia 60 kg painavassa sähkökeskuksessa näkyvät kuviossa 30. Tuloksista voidaan nähdä, että Z-akselilla eli pystysuuntaisella akselilla olivat kaikkien voimakkaimmat värähtelyt. Z-akselin huippuarvo oli noin  $1,80 \text{ m/s}^2$ . X-akselin eli ajo-/vetosuuntaisen liikkeen suuntaiset värähtelyarvot olivat voimakkaimmillaan  $0,85 \text{ m/s}^2$ . Y-akselin eli sivuttaissuuntaisen akselin värähtelyarvot olivat suurimmillaan  $0,70 \text{ m/s}^2$ .



Kuvio 30. Värinänmittaus ilman vaimentimia, keskuksen paino 60 kg.

Seuraavaksi sähkökeskuksen painoa lisättiin. Sähkökeskus painoi nyt 84,5 kg. Eniten muutoksia edelliseen mittaukseen verrattuna tapahtui Z-akselilla eli pystysuuntaisella akselilla. Z-akseliin kohdistunut värähtely oli nyt voimakkaimmillaan  $1,50 m/s^2$ . Värähtely Z-akselilla oli nyt hieman vaimeampaa kuin edellisessä mittauksessa. Y-akselin suuntaisen värähtelyn huippuarvo oli noin  $0,75 m/s^2$ . X-akselin suuntainen värähtelyn huippuarvo oli noin  $0,70 m/s^2$ .

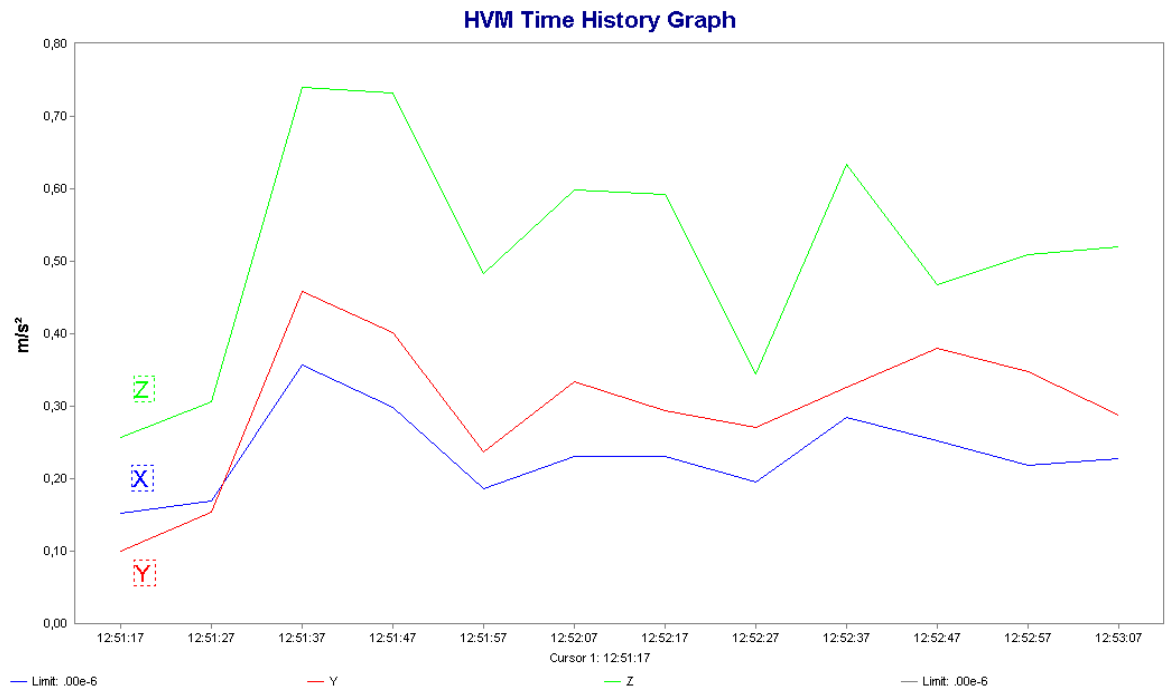
### 6.3.2 Mittaustulokset Paulstradyn-vaimentimilla

Värinänmittaukset suoritettiin sähkökeskuksesta, joka oli kiinnitetty pumppukärryn päällä olevaan lavaan Paulstradyn 533704 -vaimentimilla. Yhden vaimentimen nimelliskuorma on 20 kg. Kaikkien neljän vaimentimien nimelliskuorma on yhteensä 80 kg. Mittauksissa keskuksen paino oli aluksi 84,5 kg eli suunnilleen vaimentimien nimelliskuorman painoinen.

Kuvion 31 mittaustuloksissa pystysuuntaisen akselin eli Z-akselin suuntaisen värähtelyn huippuarvo oli  $0,75 m/s^2$ . Y-akselin eli sivuttaissuuntaisen akselin värähtelyn huippuarvo oli  $0,45 m/s^2$ . X-akselin eli ajo-/vetosuuntaisen liikkeen värähtelyn huippuarvo oli  $0,35 m/s^2$ . Tuloksista voidaan nähdä, että värähtely vähentyi selke-

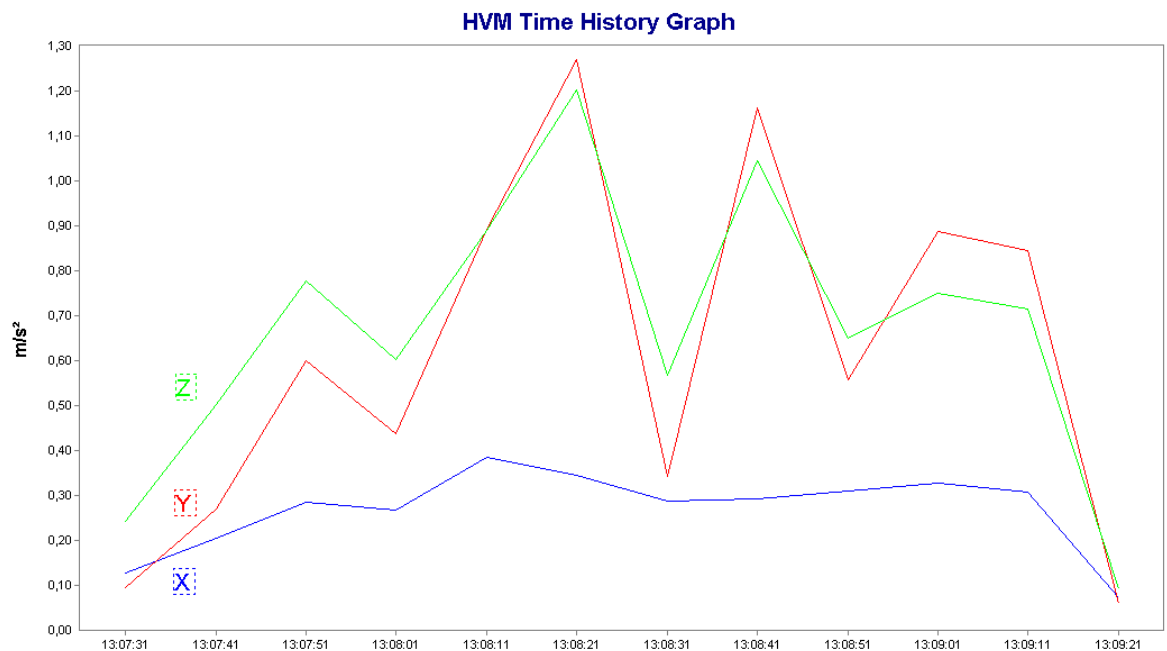


ästi, kun sähkökeskukseen lisättiin värinänvaimentimet. Kaikkien akselien suuntaiset värähtelyt suunnilleen puolittuivat värinänvaimentimien vaikutuksesta.



Kuvio 31. Värinänmittaus Paulstradyn-vaimentimilla, keskuksen paino 84,5 kg.

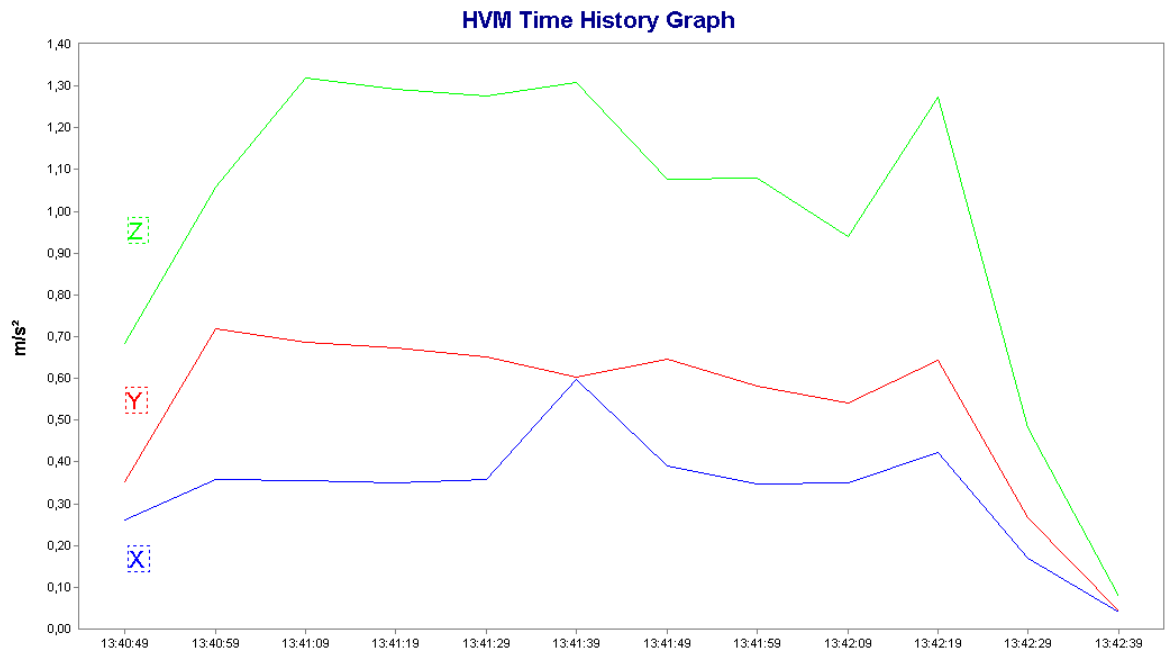
Sähkökeskuksen paino laskettiin 60 kg:aan ja tutkittiin, miten paljon värähtelyyn vaikuttaa, että sähkökeskuksen paino on reilusti alle vaimentimien nimelliskuorman (80 kg). Kuviossa 32 näkyvistä tuloksista voidaan huomata, että värähtelyt kasvoivat, kun keskuksen painoa vähennettiin reilusti alle nimelliskuorman. Verrattuna edelliseen mittaukseen värähtely lisääntyi eniten Y-akselilla ollen nyt  $1,25 m/s^2$  ja edellisessä mittauksessa  $0,45 m/s^2$ . Z-akselin suuntaiset värähtelyt olivat nyt  $1,20 m/s^2$  ja edellisessä mittauksessa  $0,75 m/s^2$ . X-akselin suuntaiset värähtelyt pysyivät suunnilleen samoina kuin edellisessä mittauksessa.



Kuvio 32. Värinänmittaus Paulstradyn-vaimentimilla, keskuksen paino 60 kg.

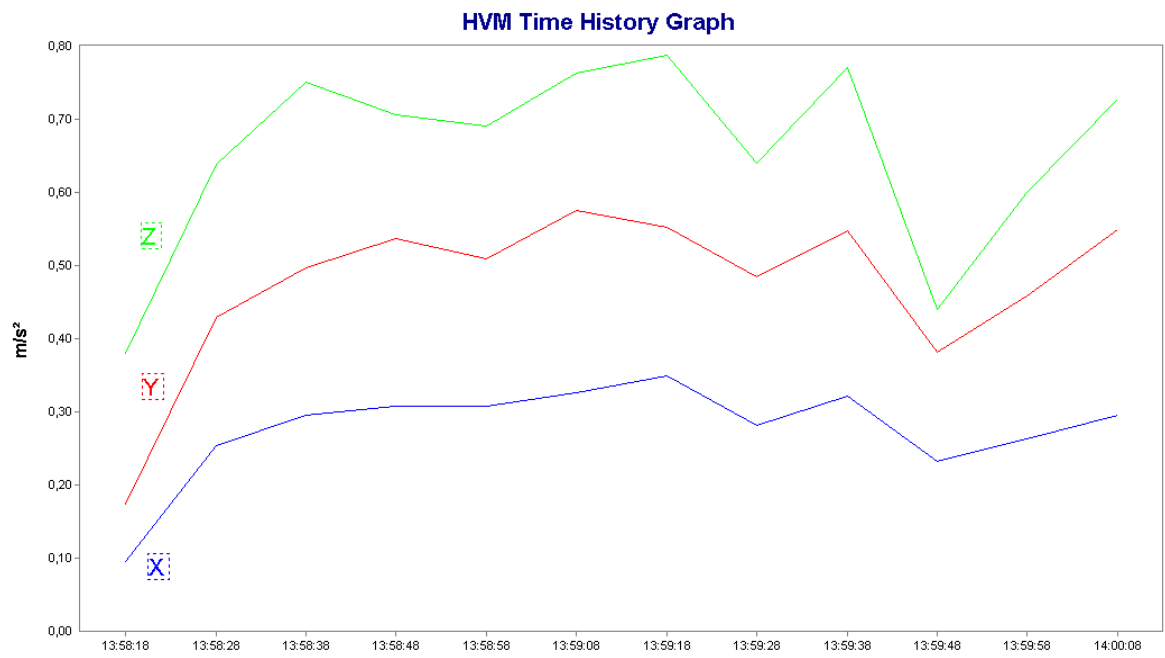
### 6.3.3 Mittaustulokset Radiaflex-vaimentimilla

Värinänmittaukset suoritettiin sähkökeskuksesta, joka oli kiinnitetty pumppukärren päällä olevaan lavaan Radiaflex 521310 -vaimentimilla. Yhden vaimentimen nimelliskuorma aksiaalisuuntaiselle kuormalle on 80 kg. Kaikkien neljän vaimentimen nimelliskuorma on yhteensä 320 kg. Mittauksissa keskuksen paino oli aluksi 84,5 kg eli noin neljännes vaimentimien nimelliskuormasta. Kuviosta 33 nähdään että Z-akselin eli pystysuuntaisen akselin värähtely oli kaikkein voimakkainta. Z-akselilla huippuarvo oli 1,30  $\text{m/s}^2$ . Y-akselilla värähtelyn huippuarvo oli 0,70  $\text{m/s}^2$  ja X-akselilla värähtelyn huippuarvo oli 0,60  $\text{m/s}^2$ .



Kuvio 33. Värinämittaus Radiaflex-vaimentimilla, keskuksen paino 84,5 kg.

Seuraavaksi sähkökeskuksen painoa lisättiin huomattavasti. Tässä mittauksessa keskuksen paino oli 149 kg eli melkein puolet vaimentimien nimelliskuormasta. Sähkökeskuksen painon lisäämisellä tutkittiin, miten painon lisääminen lähemmäksi vaimentimien nimelliskuormaa vaikuttaa värähtelyjen voimakkuuteen. Kuviossa 34 on painojen lisäämisen jälkeen tehdyn mittauksen tulokset. Verrattuna edelliseen mittaukseen värähtelyt lähes puolittuivat Z- ja X-akseleilla. Z-akselin suuntaiset värähtelyt olivat nyt  $0,80 \text{ m/s}^2$  ja edellisessä mittauksessa  $1,30 \text{ m/s}^2$ . Värähtelyt X-akselin suunnassa olivat nyt  $0,35 \text{ m/s}^2$  ja edellisessä mittauksessa  $0,60 \text{ m/s}^2$ . Myös Y-akselin suuntaisen värähtelyn voimakkuus laski hieman edellisestä mittauksesta ollen nyt  $0,55 \text{ m/s}^2$ .



Kuvio 34. Värinämittaus Radiaflex-vaimentimilla, keskuksen paino 149 kg.

## 7 JOHTOPÄÄTÖKSET

Hyllystöhissin värinänmittauksia tehdessä huomattiin värähtelyt hyllystöhissin sähkökeskuksissa vaimeiksi, vaikka sähkökeskukset oli asennettu ilman värinänvaimentimia. Mittauksissa suurin värähtely tapahtui hyllystöhissin pysähtyessä täydestä vauhdista paikoilleen. Hyllystöhissin suurin värähtely oli tällöin  $1,20 \text{ m/s}^2$ . Tutkittavissa sähkökomponenteissa värähtelynkestävyydet vaihtelivat  $49 \text{ m/s}^2$  -  $84 \text{ m/s}^2$  välillä. Mittaustuloksista voidaan nähdä, että sähkökomponentit kestävät erinomaisesti suurimmankin värähtelyn mitä hyllystöhissi sai aikaan.

Kun hyllystöhississä todettiin värähtelyt vaimeiksi, suunniteltiin mittaus, jossa sähkökeskusta vedettiin pumppukärkyjen päällä. Mittaukset suoritettiin aluksi siten, että keskus oli kiinnitetty lavaan ilman vaimentimia. Tämän jälkeen keskus kiinnitettiin lavaan vaimentimien kanssa. Vaimentimina käytettiin Paulstradyn- ja Radiaflex-vaimennintyyppejä. Värähtelyt vaimenivat selvästi, kun keskukseen lisättiin vaimentimet. Värähtelyt ilman vaimentimia olivat suuruudeltaan  $1,50 \text{ m/s}^2$  -  $1,80 \text{ m/s}^2$ . Lisättäessä vaimentimet suurin värähtely oli  $0,75 \text{ m/s}^2$  eli värähtelyt puolittuivat.

Mittauksissa tutkittiin myös erisuuruisten kuormien vaikutusta värinänvaimentimien toimivuuteen. Vaimentimien toimivuutta kokeiltiin nimelliskuormaa kevyemmällä kuormalla ja lähempänä nimelliskuormaa olevalla kuormalla. Sekä Paulstradyn- että Radiaflex-vaimentimilla tehdyissä mittauksissa värähtelyt olivat huomattavasti pienempiä nimelliskuormaa lähempänä olevalla kuormalla, kuin liian kevyellä kuormalla. Liian kevyellä kuormalla värähtelyt olivat  $1,20 \text{ m/s}^2$  -  $1,30 \text{ m/s}^2$ . Lähempänä nimelliskuormaa olevalla kuormalla värähtelyt olivat  $0,70 \text{ m/s}^2$  -  $0,75 \text{ m/s}^2$ . Koska värähtelyt olivat vaimeampia nimelliskuormaa lähempänä olleilla kuormilla, kannattaa vaimentimet valita niin, että vaimentimien nimelliskuorma vastaa sähkökeskuksen painoa.

## 8 YHTEENVETO

Materiaalinkäsittelyjärjestelmiä valmistavassa Pesmel Oy:ssä on havaittu, että hyllystöhissien ja siirtovaunujen sähkökeskuksiin on kohdistunut liiallista värinää. Värinät ovat aiheuttaneet keskuksien sähkökomponenteissa vikaantumisia ja jopa vaurioitumisia. Työn tavoitteena on tutkia, miten liiallista värinää voidaan vaimentaa ja mitä vaimentamisessa on tärkeää ottaa huomioon.

Työssä tarkastellaan aluksi värähtelytekniikan perusteita ja harmonista värähdysliikettä. Värähtelytekniikan perusteista käsitellään vapaata vaimentamatonta värähtelyä, vapaata vaimennettua värähtelyä ja vapaata jaksollista pakkovärähtelyä. Värähdysliikkeellä tarkoitetaan tietyn pisteen, eli tasapainoaseman ohi edestakaisin toistuvaa jaksoittaista liikettä.

Värinänvaimentimien tarkoitus on vaimentaa ja vähentää vaimennettavan kohteen liiallista värinää. Vaimentimia on sekä paikallaan oleviin että liikkuviin kohteisiin. Värinänvaimentimia on olemassa aksiaaliselle ja radiaaliselle kuormitustilanteelle. Kuormitustilanteessa vaimentimeen kohdistuu vaimennettavan kohteen massan suuruinen paino eli kuorma. Aksiaali- eli puristussuuntaisessa kuormitustilanteessa vaimentimeen kohdistuu kuorma ylhäältä alaspäin ja vaimennin on asennettu käyttöympäristöön vaakasuoralle tasolle. Radiaali- eli leikkaus- eli säteittäissuuntaisessa kuormitustilanteessa vaimentimeen kohdistuu sivuttaissuuntainen kuorma. Vaimennin on asennettu käyttöympäristöön tällöin pystysuoralle tasolle.

Paulstradyn- ja Radiaflex-vaimentimet valittiin käytettäväksi värinämittauksessa, jossa sähkökeskusta vedettiin pumppukärkyjen päällä. Paulstradyn-värinänvaimennin on vaimennintyyppi, joka on ominaisuuksiltaan tarkoitettu aksiaalisuuntaiseen kuormitustilanteeseen. Vaimennin on asennettava tällöin vaakasuoralle tasolle. Radiaflex-värinänvaimennin on vaimennintyyppi, joka ominaisuuksiltaan soveltuu sekä aksiaalisuuntaiseen että radiaalisuuntaiseen kuormitustilanteeseen. Tämä tarkoittaa sitä, että vaimennin voidaan asentaa vaaka- tai pystysuoralle tasolle.

Väri­nän­vai­mentimet voidaan valita vaimenninkohtaisista valintataulukkoista kuormituksen mukaan. Väri­nän­vai­mentimia valittaessa on huomioitava asennuskohteen kuormitustilanne. Kuormitustilanne riippuu vaimennettavan kohteen eli esimerkiksi sähkökeskuksen asennosta, painosta ja painopisteestä. Paulstradyn-väri­nän­vai­mentimien valintataulukossa jokaisella vaimenninmallilla on tietyn suuruinen nimelliskuorma. Nimelliskuormalla tarkoitetaan yhden vaimentimen päälle kohdistuvaa suositeltavaa kuormaa. Radiaflex-vaimentimien valintataulukossa on kerrottu vaimentimen maksimikuorma. Maksimikuorma tarkoittaa suurinta sallittua kuormaa, joka vaimentimeen voidaan kohdistaa. Väri­nän­vai­mentimen asennuksessa on tärkeää, että vaimennin asennetaan oikein ja asennuksessa käytettäviä ohjeita noudatetaan.

Työssä tutkittiin myös millaisia ovat hyllystöhisseissä ja siirtovaunuissa käytettyjen sähkökomponenttien värähtelynkestävyysarvot. Värähtelynkestävyysarvolla tarkoitetaan värähtelyä, joka sähkökomponentin pitäisi vikaantumatta kestää. Värähtelynkestävyydet kaikilla tutkittavilla komponenteilla olivat yleisesti hyvät eli niiden pitäisi kestää melko suurta värähtelyä.

Väri­nän­mittaukset suoritettiin aluksi Pesmel Oy:ssä sijaitsevasta korkeavarastojärjestelmän hyllystöhissistä. Korkeavarastojärjestelmä käsittää varastohyllystön, hyllystöhissin ja varastohallintajärjestelmän. Mittauksia suoritettiin hyllystöhissin pää- sekä ohjauskeskuksesta. Mittauksissa käytettiin Larson Davis HVM 100 -värähtelynmittauslaitteistoa. Mittarilla voidaan mitata kolmiakselisesti samanaikaisesti X-, Y- ja Z-akselien värähtelyä. Väri­nän­mittarin anturi sijoitettiin hyllystöhissin pääkeskuksessa Din-kiskoon. Hyllystöhissin ohjauskeskuksessa väri­nän­mittarin anturi kiinnitettiin suoraan keskuksen pohjalevyyn. Mitta-anturia kiinnittäessä huomioitiin anturin koordinaattien X-, Y-, Z-akselien suunnat.

Hyllystöhissin väri­nän­mittauksien ajatuksena oli mitata, minkälaisia värinöitä hyllystöhissin normaaleissa käyttötilanteissa esiintyy ja vertailla niitä tutkittavien komponenttien saatuihin väri­nän­kestoisuuksiin. Värähtelyt hyllystöhissin sähkökeskuksissa todettiin vaimeiksi, vaikka sähkökeskukset oli asennettu ilman väri­nän­vai­mentimia. Hyllystöhissin väri­nän­mittauksissa suurimman värähtelyn sai aikaan se, kun hissi pysähtyi kokonaan odottamattomasti täydestä vauhdista, eikä ehtinyt

hidastamaan jarruttamalla nopeuttaan, kuten normaalissa käyttötilanteessa. Hyllystöhissin suurin värähtely oli tällöin  $1,20 \text{ m/s}^2$ . Tutkittavissa sähkökomponenteissa värähtelynkestävyydet vaihtelivat  $49 \text{ m/s}^2$  -  $84 \text{ m/s}^2$  välillä. Mittaustuloksista voidaan nähdä, että sähkökomponentit kestävät erinomaisesti suurimmankin värähtelyn mitä hyllystöhissi sai aikaan.

Kun mitatut värinät hyllystöhississä todettiin melko vaimeiksi, suoritettiin mittaus, jossa sähkökeskusta vedettiin pumppukärryjen päällä ja mitattiin sähkökeskukseen kohdistuneita värinöitä. Pumppukärryn päällä oli puinen kuormalava, johon sähkökeskus oli kiinnitettynä. Mittauksissa värinämittarin anturi kiinnitettiin keskukseen Din-kiskoon. Ensin mittaukset suoritettiin siten, että sähkökeskus oli kiinnitettynä suoraan kuormalavaan ilman vaimentimia. Sen jälkeen kiinnitettiin sähkökeskus kuormalavaan vaimentimien kanssa ja tehtiin mittaukset uudelleen. Tällöin voidaan mittaustuloksista nähdä miten suuria vaikutuksia on sillä, onko keskus asennettu värinänvaimentimien kanssa vai ilman. Ensin sähkökeskusta testattiin Paulstradyn 533704 -vaimentimilla ja sitten Radiaflex 521310 -vaimentimilla. Kun keskukseen lisättiin vaimentimet ja tehtiin mittaukset, huomattiin että värähtelyt vaimenivat selvästi. Värähtelyt ilman vaimentimia olivat suuruudeltaan  $1,50 \text{ m/s}^2$  -  $1,80 \text{ m/s}^2$ . Vaimentimien kanssa suurin värähtely oli  $0,75 \text{ m/s}^2$  eli värähtelyt puolituivat.

Mittauksissa tutkittiin myös erisuuruisten kuormien vaikutusta värinänvaimentimien toimivuuteen. Vaimentimien toimivuutta kokeiltiin nimelliskuormaa kevyemmällä kuormalla ja lähempänä nimelliskuormaa olevalla kuormalla. Sähkökeskuksen painon ollessa lähellä nimelliskuorman mukaista painoa, vähentyivät värähtelyt reilusti. Koska värähtelyt olivat vaimeampia nimelliskuormaa lähempänä olleilla kuormilla, kannattaa vaimentimet valita niin, että vaimentimien nimelliskuorma vastaa sähkökeskuksen painoa.



## LÄHTEET

- Heiskanen, A. 2.3.2011. Myyntipäällikkö. SKS Mekaniikka Oy. Keskustelua eri värinänvaimennintyyppien kiinnitystavoista. [Henkilökohtainen sähköpostiviesti]. Vastaanottaja: Otto Isoniemi. [Viitattu 2.3.2011].
- HVM 100. Ei päiväystä. Käsi- ja kehotärinämittari. [Ppt-esitys]. Larson Davis Inc. [Viitattu 20.1.2010].
- Kärkkäinen, M. Ei päiväystä. Värähtelytekniikan perusteet. [Viitattu 15.3.2012]. Luentomoniste. Seinäjoen ammattikorkeakoulu. Tekniikan yksikkö, mekatroniikan koulutusohjelma. Julkaisematon.
- Laitinen, A. 16.3.2010. Tuotepäällikkö. Siemens Oy, Automation and Drives. Tietoa sähkökomponenttien värinänkestoisuusarvoista. [Henkilökohtainen sähköpostiviesti]. Vastaanottaja: Otto Isoniemi. [Viitattu 16.3.2010].
- Low- Voltage Controls and Distribution. 2009. Monitoring and Control Devices: Reference Manual. Siemens AG.
- Miniature circuit breakers. Ei päiväystä. System pro M compact Miniature circuit breakers: S200. ABB. Esite.
- Paulstra värinänvaimentimet. 2005. Paulstra värinänvaimentimet: mekaaniset rakenneosat. [Verkkajulkaisu]. SKS-mekaniikka Oy. Rakennuspaino Oy. [Viitattu 23.3.2010]. Saatavana: [http://www.sks.fi/download/sks\\_paulstra\\_varinanvaimentimet](http://www.sks.fi/download/sks_paulstra_varinanvaimentimet)
- PCB Piezotronics Inc. 2009. Model HVM 100: Human Vibration Meter Technical Reference Manual. USA.
- Peltonen, H., Perkkiö, J. & Vierinen, K. 2004. Insinöörin (AMK) fysiikka osa 2. Saarijärvi: Lahden teho-opetus.
- Pennala, E. 1999. Koneiden ja rakenteiden värähtelyt. Helsinki: Yliopistokustannus.
- Pesmelille oma korkeavaraston testi- ja koulutusympäristö. 2010. Organisaatio-Sanomat 9/2010, 9. [Verkkolehtiartikkeli]. [Viitattu 12.11.2011]. Saatavana: [www.organisaatio-sanomat.com/syyskuu2010.pdf](http://www.organisaatio-sanomat.com/syyskuu2010.pdf)
- Pesmel Oy. Ei päiväystä. Company. [Verkkosivu]. [Viitattu 5.3.2012]. Saatavana: <http://www.pesmel.com/english/company/company/>
- Residual Current Devices. Ei päiväystä. Residual Current Devices: F200 Series. ABB. Esite.

Suomen Luettelomedia Oy. Ei päiväystä. Pesmel Oy. [Verkkosivu].  
[Viitattu 5.3.2012]. Saatavana:  
<http://www.luettelomedia.com/pesmel-oy-kauhajoki-183712/>

